

GHIORGHE CĂLUGĂRU
CONSTANTIN COTAE

Lichide magnetice



...for

RESTITUITI CAPEA LA TRIMENUL	
1	240
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	

COLECȚIA „ȘTIINȚA PENTRU TOȚI”
apare sub egida
CONSILIULUI NAȚIONAL
AL
FRONTULUI UNITĂȚII SOCIALISTE

GHIORGHE CĂLUGĂRU
CONSTANTIN COTAE

Lichide magnetice



EDITURA ȘTIINȚIFICĂ ȘI ENCICLOPEDICĂ
București, 1978

Coperta colecției: EUGEN KERRY

Lichide magnetice

Redactor: VIRGIL SPULBER

Tehnoredactor: CONSTANTIN IORDACHE

1. INTRODUCERE

Din cele mai vechi timpuri se știe că numai substanțele magnetice solide prezintă puternice proprietăți magnetice, deși, pînă în prezent, nu este înfirmată teoretic posibilitatea existenței unui lichid monofazic cu proprietăți feromagnetice. Orice lichid este, din punct de vedere al proprietăților sale magnetice, diamagnetic sau paramagnetic. Un lichid cu puternice proprietăți magnetice poate fi însă obținut prin dispersarea coloidală a unor particule magnetice solide fine într-un lichid obișnuit. Un asemenea sistem bifazic, foarte sensibil la cîmpul magnetic, care se comportă ca un lichid omogen, a căpătat denumirea de „lichid magnetic“.

Descoperite în jurul anului 1960 la NASA, lichidele magnetice au apărut ca un mijloc de control al carburanților în motorul rachetă, în condiții de imponderabilitate. Efortul de pionierat în studiul, producerea și utilizarea acestor lichide magnetice a fost făcut de grupul de cercetare condus de R. E. Rosensweig de la „Ferrofluidics Corporations“. Deși la NASA au fost găsite alte metode pentru rezolvarea problemelor propuse inițial (a carburanților și a sistemelor de control în sateliți), lichidele magnetice au devenit obiect de cercetare în multe țări cum ar fi R. S. România, U.R.S.S., Franța etc. și au condus la descoperiri importante în ferohidrodinamică.

Lucrările de pionierat ale lui Rosensweig și Kaiser au stabilit un preț de 75—85 dolari pentru 10 ml de lichid magnetic, dar, după circa 10 ani, Khalafalla, schimbînd metoda de preparare, a reușit să reducă de zeci de mii de ori prețul de cost, ceea ce a permis studierea și găsirea multor posibilități de aplicare a lor în industrie.

La prima vedere, nimic nu pare complicat cînd se spune lichid magnetic. El constă dintr-o suspensie coloidală de particule magnetice fine (cu diametrul în jur de 100 Å) într-un lichid de bază. Din cauză că particulele sînt atît de mici, agitația termică — mișcarea browniană — le menține în suspensie pentru a nu sedimenta sau aglomera, așa cum se întîmplă cu pilitura de fier într-un cîmp magnetic. În plus, particulele sînt învelite cu un agent dispersant, pentru a preveni aglomerarea lor datorită interacțiunilor magnetice dintre ele.

Lichidele magnetice pot fi obținute folosind o varietate largă de lichide printre care enumerăm apa, glicerina, hidrocarburile, siliconii și fluorocarburile. Ele au o gamă largă de valori ale viscozității, umidității, densității, miscibilității, tensiunii superficiale și ale altor proprietăți fizice și chimice. Concentrația în particule magnetice conferă lichidelor magnetice proprietățile magnetice. Un lichid magnetic este nemagnetic în absența unui cîmp magnetic, dar manifestă puternice proprietăți magnetice în prezența unui cîmp magnetic, neavînd însă histerezis.

Excitarea unui lichid magnetic se face simplu, prin aplicarea unui cîmp magnetic de la un electromagnet sau magnet permanent. Lichidul răspunde, aproape instantaneu, prin curgere, re poziționare, sau își modifică distribuția spațială a presiunii interne. Îndepărtarea cîmpului magnetic din apropierea lichidului magnetic îl face să revină la starea lui nemagnetizată.

În interacțiunea lichidelor magnetice cu cîmpul mag-

netic s-au observat o serie de fenomene senzaționale cum ar fi:

- o cantitate de lichid magnetic poate fi suspendată în spațiu prin acțiunea unui câmp magnetic;

- un magnet permanent poate fi levitat stabil (se autosuspendă) într-un lichid magnetic;

- levitația stabilă a unui obiect nemagnetic, cufundat într-un lichid magnetic, prin aplicarea unui câmp magnetic;

- corpurile capătă o greutate specifică aparent variabilă în funcție de intensitatea câmpului magnetic și de magnetizația lichidului magnetic;

- generarea mișcării lichidului prin mijloace termice și magnetice fără a avea părți mecanice mobile;

- posibilitatea de a curge și de a conduce fluxul magnetic;

- formarea spontană a picurilor de lichid cu stabilitate mare în prezența unui câmp magnetic perpendicular la suprafața lichidului;

- rotirea unui lichid magnetic de către un câmp magnetic rotitor.

Din existența acestor fenomene specifice lichidelor magnetice rezultă o serie de aplicații unice. Cele mai multe aplicații ale lichidelor magnetice exploatează posibilitatea de poziționare și control al lor cu ajutorul unui câmp magnetic de o anumită configurație spațială. Astfel, folosind lichidele magnetice ca lubrifianți sau lichide de amortizare, magnetii permanenți sau electro-magnetii le pot aduce și menține în punctele de strictă necesitate. Când se lucrează cu vid sau sub presiune, apare problema etanșării axelor de rotație care trec prin pereții incintelor pentru antrenarea echipamentului din interior. Cu ajutorul lichidelor magnetice se pot construi dispozitive etanșoare-rotitoare, care elimină dezavantajele metodelor convenționale.

Generatoarele magnetocalorice și conducta termică exploatează fenomenul de neechilibrare a forțelor magnetice de volum, fenomen ce apare atunci când lichidul magnetic aflat într-un sistem închis este încălzit la unul dintre capetele sistemului, fapt ce determină scăderea magnetizației lichidului când temperatura se apropie de punctul Curie.

Lichidele magnetice pot fi folosite în imprimări grafice. Se cunosc, până în prezent, două tipuri de imprimări care utilizează lichide magnetice. În unul dintre ele, cerneala este magnetizată astfel încât un dispozitiv automat poate citi caracterele imprimate, iar în celălalt, cerneala este magnetizată astfel încât depunerea ei poate fi controlată magnetic.

Avântul cu care au pătruns în tehnica industrială și de laborator aceste materiale noi, succesul lor, modul de-a dreptul surprinzător în care au reușit să capteze nu numai atenția tehnicienilor și specialiștilor, își găsesc explicația în marile și multiplele necesități practice, cărora le corespund în chipul cel mai satisfăcător.

Lichidele magnetice solicită disciplinele tradiționale de inginerie electronică și electrică. Ele combină fenomenul electromagnetic cu fenomene fizice sau chimice specifice lichidelor. Lichidele magnetice folosesc atât proprietățile specifice lichidelor cât și proprietățile magnetice specifice solidelor.

În timpul istoriei lor scurte, lichidele magnetice au făcut progrese uimitoare. Dar progrese majore sînt încă de așteptat.

2. CE SÎNT LICHIDELE MAGNETICE?

După cum se știe, din punct de vedere al proprietăților magnetice, lichidele pot fi atât diamagnetice cât și paramagnetice după cum susceptivitatea lor magnetică (χ) este negativă ($\chi \simeq -10^{-4} - 10^{-6}$) sau pozitivă, ($\chi_p \simeq +10^{-4} - 10^{-7}$), dar de valori foarte mici. Un lichid cu proprietăți magnetice puternice ($\chi_{\text{lichid magnetic}} \simeq 1 - 10$) poate fi obținut prin dispersarea coloidală a particulelor magnetice fine într-un mediu de dispersie lichid, cu măsurile necesare de prevenire a sedimentării, asigurându-se totodată o stabilitate infinită a particulelor în suspensie.

Așa cum arată de altfel și W. Ostwald în lucrarea „Lumea dimensiunilor neglijabile” (1915), existența suspensiilor coloidale presupune că sub acțiunea forțelor de gravitație particulele nu se sedimentează dacă viteza de agitație termică este mult mai mare decât viteza de sedimentare, lucru realizabil prin utilizarea particulelor foarte fine, cu diametre în jur de $10 - 1000 \text{ \AA}$.

Datorită comportării duale de material lichid și material magnetic, suspensiile coloidale de particule magnetice fine au luat numele de „lichide magnetice”. Din punct de vedere al proprietăților ferohidrodinamice, lichidele magnetice constituie un sistem bifazic cu proprietăți asemănătoare materialelor magnetice solide, când

se găsesc într-un câmp magnetic, comportându-se, totodată, ca un lichid omogen, atît în prezența unui câmp magnetic cît și în absența lui.

Cu toate că dispersiile coloidale erau cunoscute încă din cel de-al șaptelea deceniu al secolului trecut, cînd Graham afirma că „substanțele coloidale se deosebesc de cele cristaline în mod radical“, abia începînd cu Pappell, în 1964, suspensiile coloidale ultrastabile de particule magnetice sînt considerate ca un lichid magnetic omogen, aparent continuu.

Efortul de pionierat în studiul, producerea și utilizarea acestor lichide a fost făcut de R. E. Rosensweig și J. L. Neuringer, care au obținut lichide magnetice ultrastabile. Ei au arătat că lichidele magnetice sînt o clasă unică de lichide în care pot fi induse forțe magnetice substanțiale, care să ducă la schimbarea radicală a comportării lichidului, atunci cînd asupra lui acționează un câmp magnetic. Lichidele magnetice au proprietatea extraordinară de a avea susceptibilitatea mare în câmp magnetic în comparație cu lichidele ordinare. Originea forței magnetice induse în lichidele magnetice se datorește particulelor magnetice care au o mărime subdomenică (100—500 Å), fiecare prezentîndu-se ca un mic magnet permanent, care, într-un câmp magnetic, H , omogen, se orientează pe direcția acestuia, iar într-un câmp magnetic neomogen au tendința de deplasare înspre zona de câmp maxim, antrenînd și lichidul înconjurător și, astfel, „conferindu-i“ un puternic caracter magnetic.

Datorită faptului că particulele sînt magnetice, apare o energie de atracție între particule, care trebuie învinsă pentru a împiedica aglomerarea, respectiv sedimentarea particulelor. De asemenea, și forțele de atracție Van der Waals, a căror energie devine foarte mare cînd particulele sînt aproape în contact, contribuie la aglomerarea particulelor și, deci, la sedimentarea acestora. Pentru

a preveni aglomerarea este necesară deci evitarea apropierii particulelor. Este necesară menținerea permanentă a unui spațiu între particule, lucru posibil prin acoperirea fiecărei particule cu un înveliș elastic, care acționează ca un agent de dispersie (fig. 1). Din figură se vede că agentul dispersant se prezintă ca un strat mole-

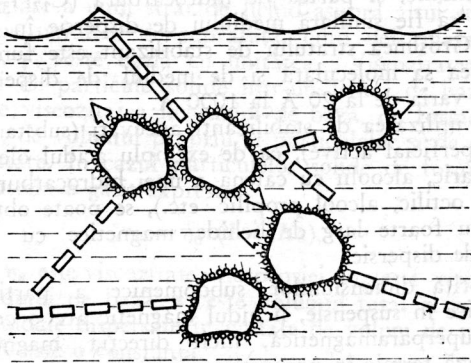


Fig. 1. Stratul monomolecular de agent dispersant, care învelește fiecare particulă, prevenind apropierea și aglomerarea lor.

cular absorbit pe suprafața fiecărei particule. Când două particule se apropie una de alta are loc o comprimare a învelișului, care provoacă o respingere elastică și care se opune forței de atracție ce ar produce aglomerarea și sedimentarea. Apare astfel o barieră care împiedică apropierea pînă la contact a particulelor din suspensie.

Comportarea magnetică a lichidelor magnetice ca un volum unitar se datorește cuplajului dintre particulele magnetice și mediul de dispersie înconjurător, care se realizează prin adăugarea unei substanțe chimice stabi-

lizatoare, care joacă rol și de dispersant și a cărei structură permite, pe de o parte, adsorbția ei la suprafața particulelor, iar pe de altă parte, dizolvarea ei în mediul de dispersie. O substanță utilizată în mod obișnuit, cu o puternică acțiune stabilizatoare, este acidul oleic ($C_{17}H_{33}-COOH$) a cărui grupă polară ($COOH$) este adsorbită pe suprafața particulei, cu care poate reacționa chimic, și partea de hidrocarbură ($C_{17}H_{33}$), care trebuie să fie similară mediului de dispersie în care se solvă. Grosimea stratului de stabilizant este funcție de greutatea sa moleculară și de mediul de dispersie, el putând varia de la 20 Å la 1000 Å.

Prin utilizarea de stabilizanți adecvați (substanțe polare superficial active), ca de exemplu acidul oleic, acidul stearic, alcoolii cu catenă a unei hidrocarburi lungi (alcool octilic, alcool propilic etc.), se poate obține un domeniu foarte larg de lichide magnetice cu diverse medii de dispersie.

Datorită dimensiunilor subdomenice a particulelor magnetice în suspensie, lichidul magnetic are o comportare superparamagnetică, încît direcția magnetizării fluctuează termic în prezența unui cîmp magnetic. Dacă se trasează ciclul de histerezis pentru un lichid magnetic, se constată că el nu prezintă remanență, iar cîmpul coercitiv este zero, în timp ce magnetizația de saturație este dependentă de concentrația de particule magnetice solide din suspensie.

Caracteristicile hidrodinamice ale lichidelor magnetice sînt date, în primul rînd, de mediul de dispersie (apă, hidrocarburi, fluorocarburi etc.) cu diverse densități și viscozități, precum și de stabilizantul utilizat, o importanță mai mică avînd natura particulelor magnetice. Bineînțeles că în momentul în care lichidele magnetice se găsesc într-un cîmp magnetic, caracteristicile hidrodinamice sînt dependente de cîmpul magnetic aplicat, revenind la caracteristicile inițiale odată cu înde-

părtarea acțiunii câmpului magnetic. În ceea ce privește lichidele reale, în dinamica acestora, se iau în considerare, în afară de forțele legate de masă și forțele de presiune, forțele de „frecare” care-și au sediul în interiorul lichidelor.

Un parametru care caracterizează frecarea internă a lichidelor este viscozitatea dinamică, η , care este forța de antrenare a unui strat de lichid asupra altui strat de lichid, pe unitatea de suprafață, când deformarea unghiulară, γ , este egală cu unitatea. Viscozitatea unei suspensii de particule solide într-un lichid de bază depinde de viscozitatea lichidului de bază, de forma particulelor, de volumul propriu al particulelor și de gradul de solvatare. În cazul particulelor solide de formă sferică, Einstein a găsit expresia

$$\eta_s = \eta_0 (1 + K\varepsilon),$$

în care η_s este viscozitatea suspensiei, η_0 este viscozitatea lichidului de bază, ε este volumul total al particulelor coloidale dispersate în unitate de volum de suspensie, iar K este o constantă.

Într-o experiență simplă, J. P. Mc Taque, în 1969, a observat un fenomen nou privind viscozitatea lichidelor magnetice și anume că aceasta depinde de câmpul magnetic. Acest fenomen a fost observat în experimentări făcute cu un viscozimetru capilar. Viscozitatea lichidului este măsurată în funcție de timpul de curgere prin tubul capilar. În cazul unui lichid magnetic, ei au observat că timpul de curgere, deci viscozitatea lichidului, crește cu creșterea intensității câmpului magnetic aplicat, ajungînd la o valoare de saturație la un câmp magnetic de circa $8 \cdot 10^4$ A/m. Mai mult, viscozitatea efectivă depinde de direcția câmpului aplicat, fiind mai mare cînd câmpul magnetic este paralel cu direcția de curgere față de cazul cînd câmpul magnetic este perpendicular la direcția de curgere.

Creșterea viscozității pentru un câmp magnetic paralel la direcția de curgere este mai mare de două ori decât creșterea pentru configurația perpendiculară a câmpului. Acest fenomen poate fi explicat calitativ astfel: viscozitatea lichidului magnetic în absența câmpului magnetic, care se datorește frecării dintre straturile de

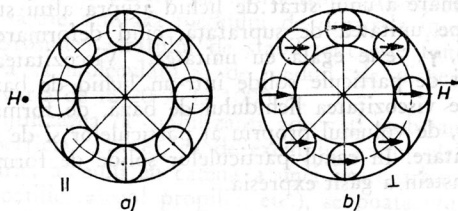


Fig. 2. Reprezentarea schematică a curgerii unui lichid magnetic într-un câmp magnetic paralel cu direcția de curgere (a) și perpendicular la direcția de curgere (b).

lichid, poate fi explicată prin analogie cu frecarea care apare între niște bile ce se învîrt între două straturi vecine de lichid. Diferența de viteză dintre aceste două straturi de lichid determină rotirea sferelor. Aplicarea unui câmp magnetic face ca mișcarea sferelor, care sînt magnetice, în jurul axelor perpendiculare pe direcția câmpului magnetic, să fie împiedicată și, deci, conduce la apariția unei frecări suplimentare între straturile de lichid, ceea ce duce la creșterea viscozității. Din figura 2 se poate vedea că creșterea viscozității pentru curgerea paralelă cu direcția câmpului H este mai mare decât creșterea pentru curgerea perpendiculară cu acesta (direcția de curgere este spre cititor). În situația din figură, în care vectorii câmp magnetic și moment magnetic sînt perpendiculari pe pagină, la câmpuri mari, toate particulele sînt împiedicate să se rotească, producîndu-se frî-

nări ale straturilor de lichid. În cazul în care momentele magnetice ale particulelor sînt perpendiculare la direcția de curgere, numai o parte din particule se pot roti. Acest fenomen specific lichidelor magnetice, observat prima dată de Mc. Tague, poartă numele de magnetoviscozitate.

Datorită posibilității soluționării unor probleme ingineresti, probleme fără soluții clasice, începînd cu anul 1968, lichidele magnetice constituie obiectul preocupării unui număr mare de colective de cercetare din diverse țări care studiază comportarea acestora în diverse configurații de cîmp magnetic, la diferite temperaturi și în diferite aplicații industriale, avînd ca fundament miraculoasele comportări ce vor fi descrise în capitolele următoare.

Larga utilizare ce s-a întrevăzut lichidelor magnetice a condus la elaborarea de diverse metode de obținere a lor, metode de preparare ce au luat denumiri legate de modul de obținere a particulelor magnetice fine. Astfel, este posibilă o clasificare a metodelor de obținere a lichidelor magnetice în metode fizico-mecanice și în metode chimice, după cum sînt prezentate în continuare.

Metoda mecanică de dispersie. Încă de la mijlocul deceniului trecut, odată cu amploarea ce a luat-o activitatea spațială a omului, au căpătat o importanță tot mai mare problemele legate de comportarea materialelor, a aparaturii și a ființelor vii în condiții de imponderabilitate. Astfel, pe măsură ce gravitația descrește, odată cu pătrunderea rachetei în spațiul cosmic, vaporii și faza lichidă din combustibilul rachetei au posibilitatea deplasării necontrolate în rezervor, creînd condiții neprevăzute. Această problemă și-a găsit rezolvarea prin utilizarea lichidelor magnetice. Cel care a întrevăzut soluția a fost omul de știință american Stephen Papell, care a preparat și utilizat pentru prima dată lichide magnetice. Metoda utilizată de acesta pentru obți-

nerea de lichide magnetice, utilizate drept carburanți în vehiculele spațiale, este metoda mecanică de dispersie. Papell a utilizat ca pulberi magnetice în dispersie, pulberi de Fe, Co, Ni și unii oxizi metalici ca Fe_3O_4 (magnetită). Dispersia magnetitei a fost realizată din pulbere obișnuită, găsită în comerț, care a fost măcinată într-o moară cu bile în prezența lichidului de bază (carburantul — heptan) și a dispersantului (acid oleic) care împiedică aglomerarea particulelor, până la divizarea fină a acestora (100—300 Å). El a utilizat o moară cilindrică, încărcată cu 3 kg de bile de oțel, ce se rotește cu 48 rot/min. Moara se încarcă cu 300 ml heptan, 30 ml acid oleic și 200 g magnetită. După circa 500 ore de măcinare se scoate amestecul și se decantează partea superioară, circa 200 ml, după care se adaugă la partea inferioară decantată, ce conține încă particule mari, circa 200 ml heptan și 20 ml acid oleic și se continuă măcinarea circa 200 ore; apoi, se decantează din nou 200 ml de suspensie stabilă, procedându-se la fel, măcinarea se continuă până când se atinge gradul de ineficiență a măcinării. După centrifugare, partea superioară decantată, de culoare maron, constituie un lichid magnetic cu o densitate și viscozitate puțin diferite de cea a heptanului și cu pronunțate proprietăți magnetice.

Utilizând aceeași metodă, au fost obținute lichide magnetice și în alte medii de dispersie, iar timpul de măcinare a fost micșorat prin creșterea procentului de stabilizant.

O dispersare mai rapidă poate fi obținută folosind mori de vibrație. Fiecare moară are patru cupe din oțel cu diametrul interior de 100 mm și înălțimea cavității interioare de 120 mm. Fiecare cupă se umple cu lichidul de bază, substanța stabilizantă, pulberea magnetică și 1 kg de bile de oțel cu diametrul de 4 mm. Un excentric rotit de un motor cu turația de 1 400 rot/min face

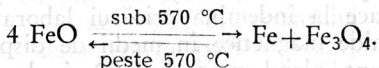
ca suportul cupelor, suspendat pe arcuri de oțel, să vibreze cu o amplitudine de pînă la 10 mm și cu o frecvență egală cu frecvența de rotație a axului motor. La aceste mori se poate atașa un sistem de încălzire a cupelor, atunci cînd natura probelor face necesar acest lucru (pentru fluidizarea unor medii de dispersie prea vîscoase la temperatura camerei).

Cu mijloace la îndemîna oricărui laborator se pot prepara lichide magnetice în medii de dispersie ca petrolul lampant, uleiul mineral K-90 și alte uleiuri neaditivate, folosind ca substanță dispersant-stabilizatoare acidul oleic, iar ca pulbere magnetică, magnetita, ce rezultă ca un reziduu în urma unor procese tehnologice de la fabricile chimice.

Pentru obținerea unui lichid magnetic cu moara de vibrație descrisă mai sus se folosește următoarea rețetă: 200 ml petrol, ce constituie mediul de dispersie, 16 ml acid oleic și 80 g de magnetită. După circa 700 ore de măcinare, probele sînt separate de bile și, după circa 100 ore de sedimentare, partea superioară este centrifugată, rezultînd un lichid magnetic a cărui magnetizație este relativ mică, cuprinsă între 1 600—4 000 A/m. Deoarece proprietățile magnetice sînt proporționale cu concentrația de particule, prin aducerea lichidului la temperatura de evaporare a mediului de dispersie, însă sub cea de distrugere a agentului stabilizant (acidul oleic), se poate crește concentrația particulelor magnetice, încît se pot obține probe cu o magnetizație de saturație de peste 16 000 A/m. Același lucru se poate obține și prin barbotarea lichidului magnetic cu azot încălzit.

S. E. Khalafalla și G. W. Reimers au arătat că timpul de măcinare poate fi redus la mai puțin de 5% dacă este utilizat un precursor nemagnetic, ca wustita, care este măcinat și dispersat într-un mediu lichid, după care este transformat în formă feromagnetică chiar în sus-

pensie. Această transformare este realizată prin încălzirea suspensiei la o temperatură sub temperatura de 570 °C, care este temperatura corespunzătoare transformării eutectectice a wustitei și care ar distruge suspensia (mediul de dispersie particule-stabilizant). Reacția chimică care are loc prin încălzirea suspensiei este o reacție reversibilă



Timpul cât este supusă suspensia la încălzire depinde de temperatură și variază de la o jumătate de oră la 10 ore. Wustita necesară se obține prin reducerea unei cantități de 200 g pudră de oxid feric la temperatura de 650 °C într-o atmosferă de CO—CO₂ (50%—50%). În urma acestei reduceri se obțin circa 180 g wustită. Răcirea ei se face în atmosferă de hidrogen, moment în care se adaugă 100 ml acid oleic. Amestecul, sub formă de pastă, se dispersează într-un litru de petrol, urmează o măcinare în jur de 50 ore, timp în care are loc divizarea particulelor nemagnetice la dimensiuni foarte mici, cu diametrul de 100 Å. Această divizare este favorizată de faptul că particulele fiind nemagnetice, chiar înainte de a fi acoperite de substanța dispersant-stabilizatoare, nu mai au tendința de aglomerare. Suspensia rezultată după măcinare este perfect stabilizată, fără însă a prezenta proprietăți magnetice. După un tratament de șase ore a suspensiei la 250 °C, wustita din suspensie trece în Fe și magnetită și, astfel, se obține o suspensie cu puternice proprietăți magnetice. Lichidul magnetic obținut prin această metodă prezintă caracteristici magnetice substanțial mai mari decât lichidele obținute prin alte metode, aceasta datorându-se prezenței particulelor de fier pur în amestec cu particulele de magnetită.

Metoda electrocondensării, utilizată încă din 1898 de G. Bredig, este o metodă spectaculoasă de obținere a

suspensiilor coloidale. Astfel, dacă într-un vas plin cu apă se găsesc doi electrozi de argint, la o distanță relativ mică, conectați la o sursă de curent continuu, între electrozi se formează un arc electric. La amorsarea arcului, în jurul electrozilor, se formează nouriși verzi-cenușii. Aceasta se datorește faptului că, la temperatura ridicată a arcului electric, metalul din care sînt construiți electrozii se pulverizează și se volatilizează. În contact însă cu mediul de dispersie a cărui temperatură este scăzută, vaporii se condensează, dînd naștere la particule disperse foarte fine. Aceste particule pot fi stabilizate prin utilizarea unui agent dispersant-stabilizant adecvat, dînd naștere la o suspensie stabilă. În cazul utilizării ca mediu de dispersie a unei substanțe organice, această metodă nu dă cele mai bune rezultate, întrucît se obțin suspensii impurificate cu carbon.

S-a constatat că obținerea de suspensii în medii organice se poate totuși realiza, așa cum au obținut Svedberg în 1905 și Lunina și Novojilov în 1969, prin înlocuirea curentului continuu cu curent alternativ de înaltă frecvență (800—900 kHz) și introducerea metalului ce urmează a fi dispersat sub formă de granule împrăștiate pe fundul vasului. Ca urmare, unicul arc este înlocuit printr-o serie de arcuri mici, care apar între particulele metalice de dispersat, producînd vaporizarea la suprafață a acestora, urmată de condensarea vaporilor în mediul de dispersie, ce are temperatura mult mai scăzută, sub formă de microparticule. Diametrul microparticulelor obținute prin această metodă este cuprins între 10 și 100 Å.

Utilizînd această metodă de dispersie, s-a putut dispersa Ag, Al, Bi, Cd, Co, Fe, Ni etc., într-o serie de medii de dispersie ca: alcooli (metilic, etilic), hidrocarburi (benzen, toluen), acetonă, etilacetat. În mediile nepolare (hidrocarburi, în general), stabilitatea disper-

siilor se menține numai în prezența unui stabilizant, ca, de exemplu, naftenatul de aluminiu.

Această metodă prezintă și unele dezavantaje prin faptul că în mediile de dispersie, cu un număr mare de atomi de carbon în moleculă, se produc carbonizări, ceea ce duce la impurificarea suspensiei. De asemenea, este posibil ca în timpul electrocondensării să se formeze și o anumită cantitate de apă, care favorizează coagularea, iar la cîmpuri mari are loc sedimentarea particulelor.

Metoda electrodepunerii. Diversele domenii în care își găsesc aplicabilitatea lichidele magnetice reclamă existența unor lichide cu caracteristici adecvate lor. Astfel, în cazul generatoarelor ferohidrodinamice (convertoarelor de energie) și a instalațiilor de transfer de căldură, sînt necesare lichide cu o puternică dependență a magnetizației de temperatură și o conductibilitate termică ridicată. Ca urmare, particulele magnetice dispersate trebuie să prezinte o puternică dependență de temperatură și să aibă punctul Curie (temperatură la care magnetizația materialelor magnetice se anulează) scăzut (în jur de 100°C). Un aliaj feromagnetic, sub formă de particule, care a dat rezultate în acest sens, a fost aliajul de Fe-Ni, a cărui dependență de temperatură este o funcție de concentrația de Fe și de Ni din aliaj. Astfel, pentru un aliaj cu concentrația de 25% Ni, 75% Fe, punctul Curie (magnetizația devine aproape zero) este cuprins între 100 și 200°C , condiții în care poate funcționa eficace o conductă termică.

S-a constatat, de asemenea, că pentru a obține un lichid magnetic cu o conductibilitate ridicată, este necesar ca mediul de dispersie să fie un metal lichid. Astfel, a fost utilizat cu bune rezultate un lichid magnetic cu particule de Fe-Ni dispersate în mercur. Cea mai avantajoasă metodă de obținere a particulelor de Fe-Ni, prin

uşurinţa cu care se pot schimba parametrii magnetici ai acestora, s-a constatat a fi metoda electrodepunerii.

Să descriem următoarea experienţă: introducem într-un vas de sticlă un amestec de sulfat de fier şi sulfat de nichel şi o cantitate oarecare de apă. Se mai introduce, de asemenea, o cantitate suficientă de mercur, care joacă rol de mediu de dispersie. În acelaşi timp, mercurul joacă rolul electrodului negativ (catod) în timpul dispersiei, iar un alt electrod sub formă de disc, ce nu se află în contact cu mercurul, joacă rol de electrod pozitiv (anod). Este necesar ca pH-ul electrolitului să fie menţinut la o valoare constantă de 9,3—9,5. La trecerea curentului electric are loc procesul de electroliză care formează particule fine de Fe-Ni la electrodul negativ (mercurul). Dimensiunile particulelor formate sînt dependente de valoarea şi stabilitatea curentului de alimentare. După un timp suficient de mare, se obţin particule magnetice de Fe-Ni într-o concentraţie suficientă pentru ca lichidul magnetic pe bază de mercur să răspundă la acţiunea unui cîmp magnetic. În mod similar, se pot prepara lichide magnetice utilizînd, în locul mercurului, un aliaj de indiu-gadoliniu-staniu, a cărui temperatură de topire este de 10,5 °C.

Metoda descompunerii termice. Din studiile făcute asupra lichidelor magnetice, constînd din particule feromagnetice fine dispersate în diverse medii, s-a constatat o pierdere a stabilităţii acestora prin agregarea particulelor, cînd lichidul se găseşte sub acţiunea îndelungată a unui cîmp magnetic puternic. O bună stabilitate în timp o prezintă dispersiile metalice preparate după metoda descompunerii termice propusă de Thomas şi colaboratorii săi în 1965. Această metodă constă din descompunerea termică a unui compus organometalic, în prezenţa unui solvent şi a unui polimer cu greutatea moleculară de cel puţin 1000. Această metodă se aplică în special la obţinerea lichidelor magnetice pe bază de particule de co-

balt, dispersate într-un solvent. De exemplu, în 250 cm³ toluen, care conține terpolimerul metilmetacrilat-etil-acrilat-vinilpirolidonă, în proporție molară de 33/66/1 și 3% metilizobutilcetona, se dizolvă 24 g de dicobalt-octacarbonil. Amestecul este agitat pînă se formează monoxid de carbon. Descompunerea termică se face prin încălzirea amestecului la 100—150 °C, în urma căreia rezultă o suspensie stabilizată de particule de cobalt, de culoare neagră. Dimensiunile particulelor pot fi modificate de la 10 la 1 000 Å prin variația concentrației componentilor. În cazurile în care particulele de cobalt au dimensiuni mai mari de 100 Å, energia de interacțiune dipolară devine mai mare decît energia de agitație termică și particulele tind să formeze lanțuri liniare, ceea ce ar conduce la un lichid magnetic mai instabil. Pentru prepararea unui lichid magnetic pe bază de particule de fier, se introduce într-un vas prevăzut cu agitator și condensator, din care s-a scos oxigenul prin introducerea azotului, 25 ml de Fe(CO)₅, 3 g de hexilmetacrilat/hidroxietilmetacrilat, într-un raport al monomerilor de 300:1, și 240 ml xilen. Amestecul este recirculat pînă cînd se dezvoltă întreaga cantitate de monoxid de carbon. Rezultatul acestei experiențe constă în obținerea unui lichid magnetic pe bază de fier cu o bună stabilitate și foarte sensibil la acțiunea cîmpului magnetic.

Metoda precipitării chimice este una dintre cele mai simple metode de obținere a lichidelor magnetice. Ea a fost propusă de Elmore în 1938, ca metodă de obținere a magnetitei, și constă în precipitarea magnetitei din soluții care conțin ioni de fier bi- și trivalent, sub acțiunea hidroxidului de sodiu în exces. În acest mod rezultă particule de magnetită de dimensiuni foarte fine, care nu mai necesită măcinarea lor. Pentru fixarea substanței dispersant-stabilizatoare pe suprafața particulelor, este suficientă o agitare puternică a lichidului de

bază cu particulele magnetice și agentul stabilizant. Practic, se procedează în modul următor: în vase de sticlă cu capacitatea de cel puțin 1 l se prepară soluțiile 10,8 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ în 300 ml apă distilată și 5,6 g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ în 300 ml apă distilată, se amestecă și se agită puternic, după care se adaugă o soluție de 10 g NaOH în 100 ml apă. Se obține un precipitat negru brun care se decantează. Se procedează la o spălare repetată cu apă pînă cînd pH-ul soluției devine neutru ($\text{pH}=7$). Se face apoi o peptizare cu HCl (0,1 N), după care se spală din nou. Se face o spălare cu acetonă sau alcool pînă la îndepărtarea apei. Se obțin 4,5 g de pulbere de magnetită cu diametrul mediu al particulelor de 100 Å. Se amestecă pulberea cu o cantitate oarecare de toluen și 2 ml acid oleic, încălzindu-se pînă la 90—100 °C, timp în care se evaporă toluenul obținîndu-se o pastă care se dispersează în proporția dorită într-un lichid purtător (de exemplu, petrol lampant). Pentru omogenizare, se agită puternic sau se introduce într-o moară cu bile timp de 20—40 ore. Caracteristicile magnetice ale lichidului depind de proporția dintre amestecul pulbere-acid oleic și mediul de dispersie. Cunoscînd, acum, modul de obținere a acestor lichide „nemaiîntîlnite”, să facem cunoștință cu cîteva proprietăți și comportări deosebite, specifice numai lor.

3. O ECUAȚIE A LUI BERNOULLI PENTRU LICHIDELE MAGNETICE ?

O cunoscută relație de bază în mecanica fluidelor este ecuația lui Bernoulli, care corelează presiunea p într-un fluid care curge, viteza sa, v , și înălțimea sa, h , în câmpul gravitațional. În cea mai simplă formă, ecuația lui Bernoulli arată că suma a trei energii (p — energia corespunzătoare lucrului mecanic efectuat de forța ce deplasează unitatea de volum a fluidului (ceea ce este exact același lucru cu presiunea de mai sus), $\rho v^2/2$ — energia cinetică a unității de volum și ρgh — energia potențială a unității de volum) este o mărime constantă în lungul oricărei linii de curent pentru un fluid incompresibil de densitate ρ . Bernoulli a prezentat această afirmație în cartea sa *Hidrodinamica*, în 1738, și poate fi exprimată astfel:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{const.}$$

De-a lungul timpului, această ecuație a fost aplicată la probleme de curgere în conducte, prin orificii etc. Este bine de reamintit, de asemenea, că înțelegerea cea mai bună a proceselor de curgere a fluidelor se face prin examinarea diferitelor combinații ale acestor termeni. De exemplu, într-un rezervor cu apă stătătoare (viteza v este zero în orice punct), presiunea p crește cu adânci-

mea; astfel, $\Delta p = \rho g \Delta h$. Sau, dacă apa este lăsată să curgă printr-un orificiu din peretele rezervorului (presiunea p este aceeași atît la suprafață cît și în jetul liber de lichid, și anume, presiunea atmosferică), viteza de ieșire a lichidului depinde de adîncimea orificiului față de suprafața lichidului în modul următor

$$v = \sqrt{2g\Delta h}.$$

În alt caz, viteza de curgere a unui fluid într-o conductă orizontală (adîncimea h este aceeași peste tot) este dată de

$$v = \sqrt{2\Delta p / \rho}.$$

Se pune întrebarea: este corectă ecuația lui Bernoulli și pentru lichidele magnetice? Răspunsul este nu! Întrucît, în cazul lichidelor magnetice trebuie ținut seama de energia feromagnetică. Este deci necesară introducerea unui termen suplimentar a cărui expresie calculată în condiții simplificatoare este

$$-\mu_0 \int_0^H \overline{M}_l dH,$$

unde μ_0 este permeabilitatea magnetică a vidului, iar $\overline{M}_l$ este magnetizația medie a lichidului magnetic.

În acest caz, se poate scrie o ecuație a lui Bernoulli și pentru lichidele magnetice

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh - \mu_0 \int_0^H \overline{M}_l dH = \text{const.}$$

Influența cîmpului magnetic asupra lichidului magnetic se manifestă prin prezența ultimului termen din primul membru al ecuației de mai sus. Această expresie este specifică lichidelor magnetice, reflectînd comportarea duală a acestora, ca lichid și ca substanță magnetică.

4. LEVITAȚIA ÎN LICHIDE MAGNETICE

Un fenomen neobișnuit, care a stimulat în mare măsură curiozitatea și interesul practic în tehnologia lichidelor magnetice a fost și este fenomenul de levitație. În 1966, Rosensweig a observat, pentru prima dată, că un corp nemagnetic poate fi suspendat în interiorul unui lichid magnetic, când acesta este supus unui câmp magnetic extern creat de o sursă externă de câmp (fig. 3, a). Într-o altă experiență, el a observat că un magnet permanent, scufundat într-un lichid magnetic, se autosuspendă, fără a fi în contact cu fundul sau pereții vasului, fiind levitat stabil de presiunea lichidului, generată de câmpul magnetic propriu al magnetului (fig. 3, b).

Dar să pătrundem mai în profunzimea acestor fenomene. S-a născut întrebarea: care este mecanismul de levitație a corpurilor nemagnetice scufundate într-un lichid magnetic cu densitatea mai mică decât a acestora, când din exterior acționează un câmp magnetic? Astăzi se cunoaște că, atât în absența mișcării cât și a forțelor gravitaționale, distribuția presiunii într-un lichid magnetic este puternic afectată de un câmp magnetic exterior. Sub formă matematică, afirmația de mai sus este reprezentată de esența lui Bernoulli simplificată

$$p - \mu_0 \int_0^H \overline{M}_l \, dH = \text{const.}$$

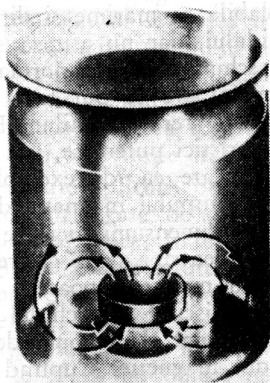
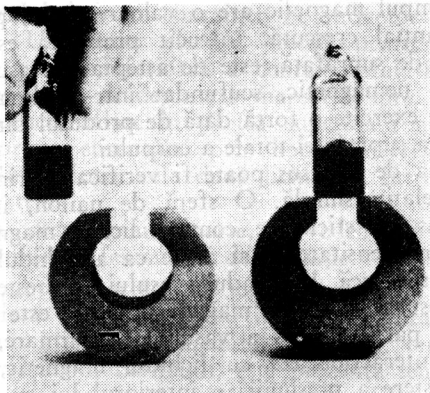


Fig. 3. a) Levitația unui corp nemagnetic într-un lichid magnetic, sub acțiunea unui câmp magnetic exterior; b) levitația stabilă a unui magnet permanent într-un lichid magnetic sub acțiunea câmpului magnetic propriu.

Dacă câmpul magnetic are o valoare mare, presiunea este substanțial crescută. Întrucât presiunea este forța pe unitate de suprafață, este de așteptat ca asupra oricărui corp nemagnetic, scufundat într-un lichid magnetic, să se exercite o forță dată de produsul dintre presiune și aria suprafeței totale a corpului.

Afirmația de mai sus poate fi verificată printr-o experiență relativ simplă. O sferă de nailon, introdusă într-un vas de sticlă ce conține lichid magnetic, cu toate că are densitatea mai mare ca a lichidului și ar trebui să se ducă la fundul vasului, plutește la suprafața vasului, când un magnet puternic este adus în apropierea părții de jos a vasului. Ca urmare, câmpul magnetic interacționează cu lichidul magnetic, producând o creștere a presiunii în interiorul lui cu o cantitate suficientă pentru a învinge forța de gravitație. Câmpul magnetic acționează asemănător unei forțe gravitaționale controlabilă ca mărime și direcție. Ea acționează asupra lichidului, dar nu asupra sferei de nailon și, ca urmare, ea schimbă relația normală de levitație.

Experiențe asemănătoare se pot face și cu alte materiale mai grele decât sfera de nailon. Folosind lichide magnetice cu caracteristici puternice, pot fi levitate substanțe de orice densitate ca, de exemplu, platina sau uraniul, cu ajutorul câmpului magnetic dat chiar de un magnet permanent de dimensiuni mici. Se folosește denumirea de „substanță” pentru a arăta că creșterea presiunii, prin creșterea câmpului magnetic, poate fi aplicată și la un lichid nemagnetic nemiscibil cu lichidul magnetic, cum ar fi mercurul, sau, chiar, la o bulă de gaz care este introdusă în lichidul magnetic. Cuplînd acest efect cu faptul că mercurul este bun conductor electric, apare posibilitatea de a crea contactoare electrice perfect izolate, care nu au părți sau componente ce se pot uza.

Un contactor cu lichid magnetic și mercur, fără uzură, se obține prin capsularea lichidului magnetic și

a mercurului într-un container neconductor de formă cilindrică. Un curent electric trecut printr-o bobină, aflată la partea inferioară a containerului, face ca lichidul magnetic să deplaseze mercurul spre două contacte electrice, aflate în partea superioară a containerului. Oprirea curentului prin bobină inversează relația de plutire între cele două lichide și întrerupe contactul electric.

Dar să trecem mai departe, să vedem un alt aspect ce caracterizează fenomenul de levitație.

Un aspect important al termenului, care reprezintă forța indusă magnetic ce acționează asupra corpului nemagnetic introdus în lichidul magnetic, termen apărut în ecuația lui Bernoulli, este prezența semnului minus în fața acestui termen. Fără semnul minus, el reprezintă forța care acționează asupra unui corp magnetic. Se știe că un corp magnetic plasat într-un câmp magnetic neuniform spațial se mișcă în sensul câmpului mai intens, dar, din cauza semnului minus, corpul nemagnetic, scufundat în lichidul magnetic, este supus unei forțe ce acționează în sensul câmpului magnetic mai slab. Aceasta conduce la ideea creării unei configurații de câmp care să dea o levitație stabilă corpului.

Cele mai interesante aplicații posibile ale levitației în lichide magnetice sînt legate de o aranjare mai deosebită a câmpurilor magnetice. În exemplele descrise mai sus, câmpul magnetic a fost întotdeauna asimetric. Problema care se pune este dacă se pot crea cîteva structuri de câmpuri simetrice, care să mențină obiectul nemagnetic într-o poziție stabilă. Cu alte cuvinte, se pune întrebarea: se poate plasa un obiect nemagnetic într-un câmp astfel încît o deplasare în orice direcție de la punctul lui de echilibru să dea naștere la o forță de întoarcere la poziția de echilibru? Răspunsul este: da!

Un exemplu simplu de câmp de levitație stabilă se obține cu doi magneti în formă de bară, avînd polii de

același fel opuși și așezați la o oarecare distanță convenabilă între ei. În punctul central, la mijlocul distanței dintre magneti, câmpul magnetic are valoarea zero. Orice deplasare a corpului nemagnetic spre unul dintre cei doi magneti face să apară o forță de întoarcere a corpului la poziția de echilibru.

Un alt exemplu de structură de câmp, pentru levitație stabilă, este acela obținut prin suprapunerea unui câmp magnetic uniform peste un câmp magnetic de compensare, paralel cu primul, creat de o spirală circulară conductoare, parcursă de curent electric. Se pot distinge trei cazuri în funcție de mărimea numerică a câmpului uniform H_u și mărimea numerică a câmpului de compensare H_c , pe linia de centru a spirei de curent. Când $H_u < H_c$, există două puncte de levitație stabilă, ambele pe linia de centru, la distanțe egale și opuse față de spirală. Dacă câmpul H_u crește în mărime, cele două puncte se deplasează spre centrul spirei pînă cînd, în final, ele fuzionează într-un punct la centru, pentru $H_u = H_c$. Dacă H_u continuă creșterea, adică $H_u > H_c$, levitația este stabilă în punctele situate pe un cerc concentric cu spira, dar de diametru mai mic. Un corp punctual, scufundat într-un lichid magnetic, va fi stabil oriunde de-a lungul acestui cerc.

O situație favorabilă este de a aranja mai multe perechi de electromagneți cu poli opuși într-un sistem de coordonate cartezian (fig. 4). Centrul de simetrie devine un punct de levitație stabil pentru o sferă de nailon, introdusă într-un lichid magnetic, care este conținut într-un vas sferic, fixat între piesele polare. Acest aranjament a fost folosit de R. Litte pentru proiectarea unui accelerometru triaxial. Cînd acest dispozitiv nu este accelerat, sfera de nailon rămîne în centrul sistemului; cînd dispozitivului îi este aplicată o forță, sfera de nailon, sub acțiunea forței de inerție, se mișcă din poziția de echilibru. Accelerația, legată de forță prin

legea a doua a dinamicii, $a = F/m$, poate fi astfel determinată prin măsurarea deplasării interne a bilei de nailon sau prin măsurarea intensității curentului din fiecare electromagnet, necesar a crea o presiune suficientă în lichidul magnetic pentru a menține bila de nailon în centrul vasului.

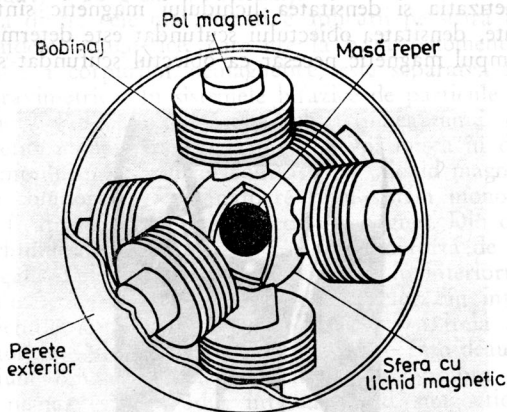


Fig. 4. Dispunerea surselor de câmp magnetic pentru crearea unui punct de levitație stabilă.

Tendința corpurilor nemagnetice, scufundate într-un lichid magnetic, plasat într-un gradient de câmp magnetic, de a se stabili în zonele de câmp minim, este folosită la proiectarea de noi dispozitive de măsurare a densității corpurilor sau de separare a materialelor cu densități diferite. Deoarece gradientul de câmp poate fi aplicat asupra unui sistem în sens contrar gravitației, forța magnetică F_m (forța magnetică pe unitate de volum), generată de câmpul magnetic, este în opoziție cu forța F_g , greutatea, care acționează asupra obiectelor

scufundate. Dacă $F_m = F_g$, obiectul levitează. Ecuația care descrie această condiție este

$$(\rho_s - \rho_l) g = \mu_0 M_l \text{ grad } H = F_m,$$

unde ρ_s este densitatea corpului solid, ρ_l este densitatea lichidului, iar g este accelerația gravitațională. Dacă magnetizația și densitatea lichidului magnetic sînt cunoscute, densitatea obiectului scufundat este determinată de cîmpul magnetic necesar ca obiectul scufundat să le-

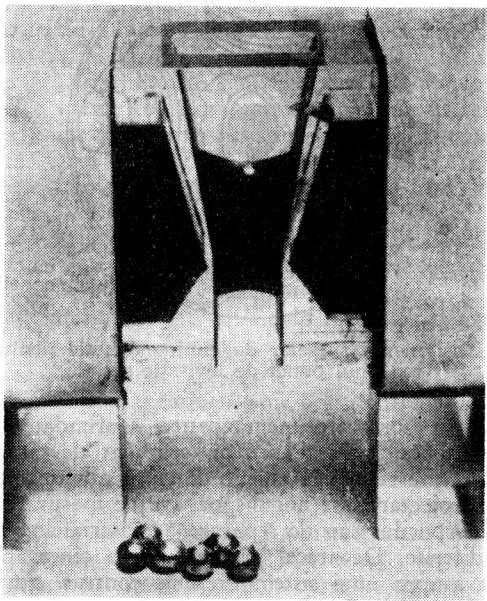


Fig. 5. O bilă de cupru plutește pe suprafața unui lichid magnetic introdus între polii unui electromagnet (ansamblu ce constituie densitometrul).

viteze. Astfel, un vas cu lichid magnetic introdus între polii unui electromagnet devine un densitometru (fig. 5). **Kaiser și Miskolczy** au construit un densitometru bazat pe acest principiu cu posibilitatea de măsurare a densităților de la 1 la 20, valori relative, cu ajutorul căruia s-au putut măsura probe cu densitățile între $3,5 \text{ g/cm}^3$ (diamant) și 20 g/cm^3 (wolfram).

Una dintre cele mai atractive aplicații pe scară largă a lichidelor magnetice, care are la bază fenomenul de levitație a corpurilor nemagnetice, este separarea magnetogravimetrică. În sistemele bifazice de particule mari într-un lichid care se găsește sub acțiunea unui câmp magnetic, numai particulele mari se vor mișca în direcția câmpului maxim. Prin contrast, un „lichid magnetic” are o comportare asemănătoare unui sistem monofazic și va fi atras ca un tot unitar de un magnet. Din cauză că lichidul se găsește într-un vas rigid, o forță de reacție, egală și de semn opus, va fi creată în interiorul lichidului, care va acționa asupra obiectelor din interiorul lichidului. Aceasta decurge din legea a treia a lui Newton. („Oricărei acțiuni îi corespunde întotdeauna o reacțiune opusă și egală.”) Prin urmare, asupra unui corp nemagnetic introdus într-un lichid magnetic, în prezența unui câmp magnetic neomogen, va acționa o forță de levitație. Forța de levitație pe unitatea de volum este egală cu $\mu_0 \bar{M}_l \text{grad } H$. Se poate, prin urmare, crește forța de levitație, fie prin creșterea magnetizației lichidului, fie prin creșterea gradientului de câmp sau, chiar, prin creșterea amîndurora.

Dar să vedem care este principiul de lucru al unui separator de materiale ce folosește tehnica levitației. Plasăm între polii unui electromagnet un vas nemagnetic ce conține lichid magnetic și un amestec de bile de cupru și aluminiu. La valori mari ale câmpului, amestecul de bile de cupru și aluminiu plutește la suprafața lichidului. Prin micșorarea câmpului magnetic, la o anu-

mită valoare a acestuia, bilele de cupru, care au densitatea mai mare decât bilele de aluminiu, trec prin lichid în partea de jos, în timp ce bilele de aluminiu încă plutesc. La o altă valoare a câmpului magnetic vor trece și bilele de aluminiu. În acest fel, se poate face separarea unui amestec de materiale de densități diferite.

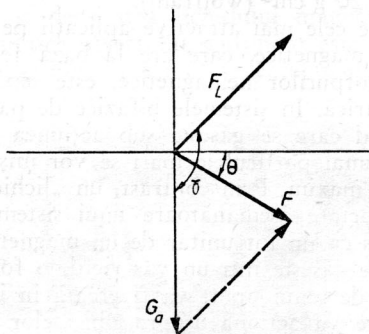


Fig. 6. Diagrama orientării forțelor pentru levitația neverticală: F_L — forța de levitație; G_a — greutatea aparentă; F — forța rezultantă; θ este unghiul de deflexie față de orizontală.

În cazul în care forța de levitație acționează într-o direcție neverticală, se poate construi un separator magnetogravimetric în care amestecul de substanțe nemagnetice, care sînt introduse pe la partea de sus, captat la partea inferioară în diferite vase. În acest separator, lichidul magnetic acționează ca un spectrograf de densitate, dirijînd particulele de material pe diferite traiectorii, în funcție de densitatea lor. O diagramă a orientării forțelor care acționează asupra particulelor este arătată în figura 6. Forța totală care acționează asupra unui corp introdus într-un lichid magnetic este egală cu suma vectorială a forțelor de gravitație și de levitație magnetică.

Știind că greutatea aparentă a unui corp de volum V este

$$G_a = V(\rho - \rho')g,$$

unde ρ este densitatea corpului, iar ρ' este densitatea lichidului magnetic, și că forța de levitație are expresia

$$F_l = \mu_0 V M_l \text{ grad } H,$$

unde M_l este magnetizația lichidului magnetic, rezultă pentru θ expresia

$$\text{tg } \theta = \frac{(\rho - \rho')g}{\mu_0 M_l \text{ grad } H \cdot \cos \gamma} - \text{tg } \gamma,$$

care mai poate lua forma

$$\text{tg } \theta = A\rho - B.$$

Dependența unghiului θ de densitatea ρ a corpului din lichidul magnetic face ca corpurile cu densități diferite să fie dirijate pe direcții ce fac diferite unghiuri cu direcția orizontală, încît sistemul funcționează ca un spectrograf de densitate (fig. 7).

În afară de separarea magnetogravimetrică, cunoașterea fenomenului de levitație a corpurilor nemagnetice într-un lichid magnetic a făcut posibilă construirea lagărelor ferohidrodinamice. În aceste lagăre se înlătură unul dintre neajunsurile principale și anume pierderea de lichid. Avînd, în locul unui lichid obișnuit, un lichid magnetic, acesta poate fi reținut în locurile de strictă necesitate. Un lagăr ferohidrodinamic lubrifiat cu lichid magnetic înlătură pierderea de lichid și, ca urmare, reduce uzura provenită la pornirea rotorului. Cea mai simplă metodă de reținere a unui lichid magnetic între un ax rotor și un lagăr constă în plasarea unui magnet în axul rotor, în lagăr sau în amîndouă părțile. Dacă magnetul este în axul rotor, lichidul magnetic este atras spre magnet, iar lagărul este supus unei forțe de levitație magnetică, îndreptată radial spre exte-

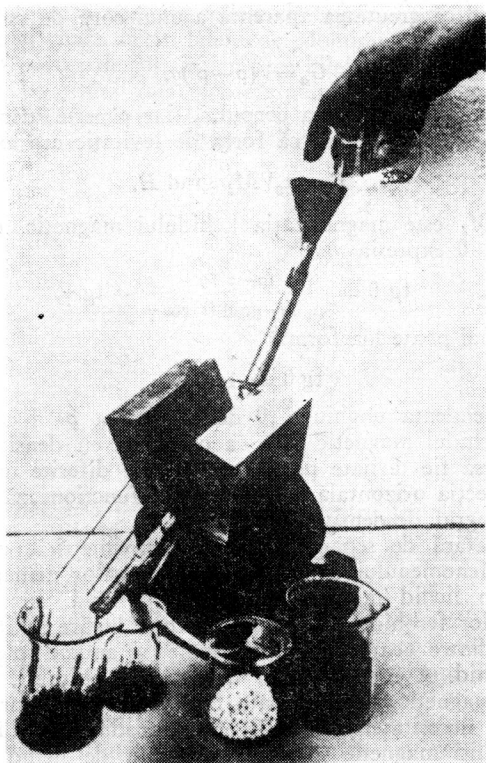


Fig. 7. Spectrograf de densitate cu lichid magnetic.

rior, ceea ce duce la autocentrarea lagărului față de ax (fig. 8).

Același fenomen de levitație a corpurilor nemagnetice stă la baza construcției amortizoarelor cu lichid mag-

netic. Un piston magnetic poate să alunece în sus și în jos într-un cilindru nemagnetic. Pistonul conține un magnet permanent și piese polare din fier, a căror formă este corespunzătoare unei focalizări a fluxului magnetic. Câmpul magnetic are valoarea cea mai mare în zona de contact a pistonului cu suprafața interioară

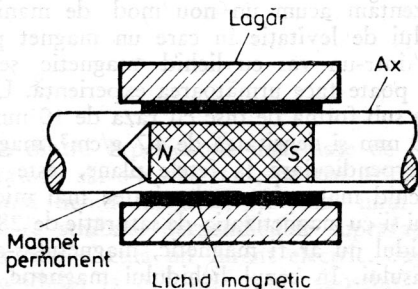


Fig. 8. Autocentrarea axului într-un lagăr cu lichid magnetic.

a cilindrului. Lichidul magnetic este atras în acele puncte și astfel apare o forță de levitație care acționează asupra peretelui cilindrului nemagnetic, care produce o centrare a pistonului în interiorul cilindrului, pe de o parte, și asigură amortizarea acestuia prin forțele de frecare, pe de altă parte.

Un alt exemplu tipic de amortizare este cazul amortizării controlabile a difuzoarelor. În acest caz, o mică cantitate de lichid magnetic este introdusă între bobină și suprafața înconjurătoare, care obișnuit este a pieselor polare din fier. Lichidul poate fi localizat numai de o parte a bobinei sau de ambele părți, după gradul de amortizare dorit. Lichidul magnetic, ținut în locul respectiv de gradientul de câmp maxim existent în acel loc, acționează prin vâscozitatea lui cu o forță de frî-

nare la mișcarea în sus și în jos a bobinei. Pe lângă amortizarea dorită, tot pe baza fenomenului de levitație, lichidul magnetic care înconjură bobina mai asigură o bună centrare a bobinei, ceea ce poate duce la eliminarea tuturor părților mecanice de centrare. Un avantaj substanțial al unui asemenea difuzor îl prezintă micșorarea distorsiunilor sunetului.

Să prezentăm acum un nou mod de manifestare a fenomenului de levitație în care un magnet permanent scufundat într-un vas cu lichid magnetic se autosuspendă. Se poate face următoarea experiență. Un magnet permanent sub formă de disc cu raza de 10 mm, cu grosimea de 5 mm și densitatea de $4,7 \text{ g/cm}^3$, magnetizat în direcție perpendiculară la fețele plane, este scufundat într-un lichid magnetic cu densitatea mai mică decât a magnetului și cu magnetizația de saturație de $28\,400 \text{ A/m}$. Dacă lichidul nu ar fi magnetic, magnetul s-ar duce la fundul vasului. În cazul lichidului magnetic, magnetul disc nu numai că levitează, dar el se menține echidistant față de pereții vasului. Poziția magnetului în lichid, determinată pe cale mecanică, indică faptul că el plutește la o jumătate de centimetru deasupra fundului vasului.

Levitația magnetului în lichidul magnetic se datorește faptului că câmpul magnetic al discului devine mai „comprimat” când discul este mișcat spre perete, densitatea liniilor de câmp devenind mai mare, ceea ce face ca presiunea, datorită ecuației lui Bernoulli, să crească și să dea forța necesară de întoarcere. O aplicație a acestui fenomen o reprezintă busola fără contact solid. Un magnet bară scufundat într-un vas cu lichid magnetic va levita și va arăta totdeauna direcția meridianului magnetic. Un ac indicator, prins de acest magnet, care iese deasupra lichidului, va arăta direcția meridianului magnetic și, deci, va reprezenta acul magnetic al busolei.

5. EXPERIENȚE CU LICHIDE MAGNETICE

Într-una dintre experiențele imaginate de Rosensweig și colaboratorii săi s-a observat, pentru prima dată, ridicarea unui lichid magnetic în jurul unui conductor vertical, care străbate perpendicular suprafața lichidului și prin care circulă un curent electric. Suprafața liberă a lichidului ia o formă mult deosebită de cea a planului orizontal (fig. 9). Câmpul magnetic creat de curentul vertical face, prin prezența sa, ca suprafața liberă a lichidului să nu mai fie plană și să-și crească înălțimea împotriva forțelor gravitaționale. Aceasta se manifestă prin ridicarea lichidului în vas în jurul conductorului.

Dar să vedem care este explicația calitativă a acestei comportări. Fiecare particulă din lichid se comportă ca un mic magnet liniar, orientându-se pe direcția câmpului magnetic, care, în acest caz, este circular în jurul conductorului metalic. În această configurație, intensitatea câmpului magnetic descrește cu depărtarea de la conductor. De-a lungul direcției circumferinței nu există gradient de câmp, așa că este natural să nu existe forțe care să acționeze în această direcție. Direcția forței magnetice, care acționează asupra particulei, $\mu_0 M_p \text{ grad } H$ (M_p este magnetizația particulei), este îndreptată în direcția gradientului de câmp, deci pe direcția radială,

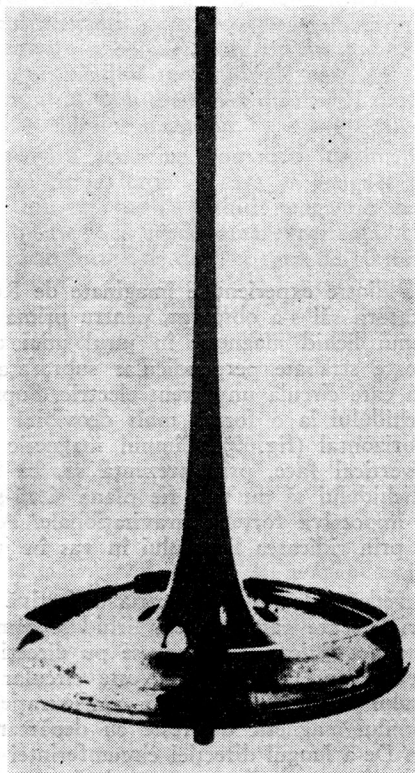


Fig. 9. Ridicarea unui lichid magnetic în jurul unui conductor vertical prin care circulă curent electric.

înspre conductor. Sub acțiunea acestei forțe se creează o presiune ce acționează pe o direcție diferită de cea a forțelor de gravitație și rezultanta acestora produce ridicarea lichidului magnetic în sus, în jurul conductorului.

În afara faptului că este o experiență amuzantă, aceasta ajută la verificarea valabilității legii lui Bernoulli pentru lichide magnetice. Deoarece pe această suprafață mișcarea este absentă (deci $v=0$), prezența câmpului magnetic conduce, conform ecuației lui Bernoulli, la creșterea presiunii, ceea ce face implicit ridicarea lichidului magnetic în jurul conductorului generator de câmp.

Într-o altă experiență se poate urmări corelarea, în ecuația lui Bernoulli, a termenului care conține viteza lichidului cu termenul care conține gradientul de câmp. Un exemplu simplu este un jet orizontal de lichid magnetic care trece liber printr-un câmp magnetic. Termenul legat de înălțimea lichidului și termenul presiune sînt constanți în lungul liniei de curent și ecuația lui Bernoulli devine

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \mu_0 \int_0^H M_l dH = \text{const.}$$

Rezultă că viteza jetului de lichid magnetic crește îndată ce jetul de lichid a intrat în câmpul magnetic și, ca urmare, secțiunea jetului se micșorează. Ieșind din câmp, jetul de lichid își micșorează viteza și își mărește secțiunea transversală la valoarea inițială.

Comportarea lichidelor magnetice aflate într-un câmp magnetic nu se limitează la cele prezentate mai sus.

Să facem următoarea experiență. Un tub de sticlă vertical, deschis la ambele capete, este montat vertical între polii unui electromagnet, care produce un gradient intens de câmp magnetic. Cu ajutorul unei seringi, o cantitate de lichid magnetic este injectată în interiorul

tubului, în regiunea întrefierului. Lichidul formează un dop, care separă regiunea de sus de regiunea de jos (fig. 10). Acest dop poate susține o sarcină creată de un lichid nemiscibil cu lichidul magnetic, pus cu seringă deasupra acestuia. Sub acțiunea greutății acestuia, dopul de lichid magnetic suferă o deplasare în jos, în

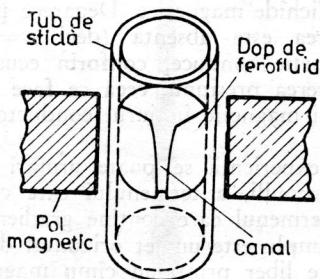


Fig. 10. Aspectul dopului de lichid magnetic.

regiunea câmpului mai puternic, măbind astfel forța magnetică de rezistență. Dacă sarcina hidrostatică depășește o anumită valoare, dopul de lichid este străpuns la centru, formându-se un mic canal, iar lichidul nemiscibil trece prin acest canal.

O variantă a acestei experiențe se poate realiza folosind un tub de sticlă deschis numai la unul dintre capete. Dopul de lichid magnetic poate izola o anumită cantitate de aer de spațiul înconjurător. Prin mișcarea în jos a tubului, volumul ocupat de aerul din partea de jos crește, presiunea acestuia scade și diferența de presiune de pe cele două fețe ale dopului de lichid magnetic crește pînă la o anumită valoare cînd o cantitate de aer dinafară străpunge dopul de lichid și intră în partea de jos.

Aplicînd legea lui Bernoulli pentru lichide magnetice la cele două suprafețe ale dopului și neglijînd înălțimea dopului se poate scrie

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \mu_0 \int_{H_1}^{H_2} M_1 dH,$$

unde p_1 și H_1 sînt presiunea și cîmpul pe suprafața de sus, iar p_2 și H_2 reprezintă presiunea și cîmpul pe suprafața de jos. Cînd diferența de presiune pe cele două fețe ale dopului depășește valoarea integralei $\mu_0 \int_{H_1}^{H_2} M_1 dH$, atunci dopul este străpuns.

O aplicație a dopului de lichid este pistonul cu lichid magnetic. În jurul unui tub vertical, la o anumită distanță, se găsesc două bobine, care creează cîte un cîmp magnetic axial cu valoarea maximă în centrul acestora. În interiorul tubului se găsește un dop de lichid magnetic, menținut de cîmpul magnetic al uneia dintre cele două bobine. Prin comutarea alternativă a alimentării electrice a celor două bobine, dopul de lichid execută o mișcare de du-te-vino. Această acționare poate fi folosită pentru pompe de joasă presiune, dar cu un înalt coeficient de siguranță și o foarte mică uzură a pieselor componente.

Într-un alt aranjament, dopul de lichid magnetic poate fi folosit la supape bistabile. Curgerea fluidelor, în sistemele de control fluidice, poate fi comandată cu supape cu lichid magnetic, acționate de bobine de comandă. Prin închiderea canalului respectiv cu lichid magnetic, fluxul de gaz este redirectionat pe un alt canal. Supapa bistabilă cu lichid magnetic este practic fără uzură, neavînd părți componente mecanice în mișcare.

Obturatorul cu lichid magnetic pentru fasciculele luminoase reprezintă o altă aplicație a dopului de lichid

magnetic. În jurul unui tub cu secțiune variabilă se găsesc două bobine la o anumită distanță. Cantitatea de lichid magnetic introdusă în tub îndeplinește condiția că în dreptul bobinei, să zicem, de sus, el să formeze un dop întreg, iar în dreptul bobinei de jos, el să formeze numai o coroană circulară. Prin acționarea electrică, pe rând, a celor două bobine, dopul de lichid, care este opac, va închide sau va deschide drumul unui fascicul de lumină.

O foarte interesantă experiență se poate realiza dacă utilizăm un lichid magnetic împreună cu un lichid gazdă, transparent și nemiscibil cu primul, de aceeași densitate. Dacă aceste două lichide sînt introduse între două plăci de sticlă și puse într-un câmp magnetic perpendicular pe plăcile de sticlă, se obține o figură specifică de labirint. În figura 11, a este reprezentată o figură de labirint obținută cu un lichid magnetic pe bază de petrol lampant de magnetizație $16 \cdot 10^3$ A/m, în amestec cu apă ca lichid gazdă, introduse între două plăci de sticlă depărtate între ele la 0,4 mm și supuse unui câmp magnetic de $8 \cdot 10^3$ A/m. Dacă pe suprafața plăcilor de sticlă se depun straturi subțiri de permaloy (aliaj Fe-Ni cu compoziția 21% și 79%) într-o structură specială cum ar fi forma de T (fig. 11, b), în dreptul acestora se formează așa-numitele bule de lichid magnetic, care pot fi deplasate de la o formă T la alt T cu ajutorul unui câmp magnetic rotitor aplicat în planul plăcilor. Vom observa că mărimea bulelor de lichid magnetic este cuprinsă între $50 \mu\text{m}$ și $1\,000 \mu\text{m}$. Dacă câmpul magnetic perpendicular este redus la zero, magnetizația lichidului tinde la zero și, ca atare, bulele lichide pierd respingerea lor mutuală și ele se reunesc.

Propagarea bulelor de lichid, sub acțiunea câmpului magnetic rotitor, de la un T la alt T , depinde de un număr mare de factori: intensitatea câmpului magnetic constant și perpendicular la plăci, intensitatea câmpului

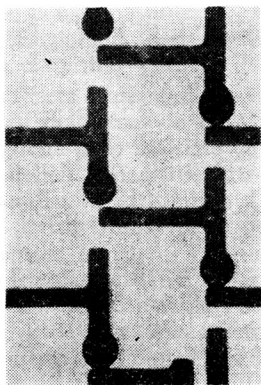
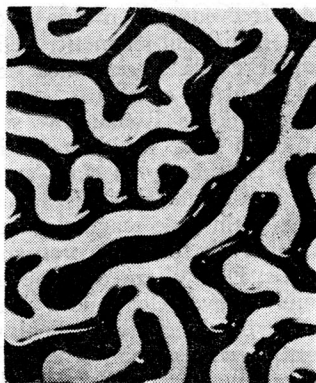


Fig. 11. a) Figura de labirint a unui lichid magnetic în amestec cu un lichid nemiscibil transparent; b) formarea bulei de lichid magnetic.

magnetic rotitor, frecvența de rotație a câmpului rotativ, magnetizația lichidului magnetic, densitatea și viscozitatea lichidului gazdă și tensiunea de la suprafața dintre cele două lichide în contact.

O experiență făcută de Romankiw și colaboratorii săi arată că în cazul unui lichid magnetic pe bază de hexan, în amestec cu apă, la un câmp magnetic perpendicular de 9 600 A/m și la un câmp magnetic de rotație de 4 800 A/m, se obțin bule magnetice care se propagă cu o frecvență de 60 Hz, ceea ce corespunde la o viteză medie de 7,2 cm/s. Deși viteza de propagare este limitată în domeniul frecvențelor audio joase, contrastul optic mare dintre bulele opace și lichidul nemagnetic înconjurător transparent, precum și simplitatea de construcție a acestora, sugerează folosirea bulelor cu lichid magnetic la sisteme de afișare. Bulele magnetice lichide au mărimea corespunzătoare pentru folosirea directă ca elemente de tablou.

6. FENOMENE CARE SE PRODUC LA SUPRAFAȚA LICHIDELOR MAGNETICE

Din numărul imens de date noi cu care se îmbogățesc cunoștințele științifice, sînt de menționat și acelea legate de „miraculoasele” fenomene ce apar la suprafața lichidelor magnetice. Astfel, regula „lichidele statice se autonivelează” nu mai este adevărată în cazul lichidelor magnetice. S-a constatat că suprafața lichidelor obișnuite este normal plană, în timp ce suprafața lichidelor magnetice este neplană, deci instabilă, cînd asupra lor acționează un cîmp magnetic.

Să facem următoarea experiență: luăm un vas nemagnetic (de sticlă) cu diametrul de 80—100 mm și introducem lichid magnetic pe o înălțime de 15—20 mm. Introducem vasul cu lichid magnetic într-un cîmp magnetic orientat perpendicular la suprafața lichidului. Dacă cîmpul magnetic aplicat (creat de o pereche de bobine Helmholtz, alimentate în curent continuu) are o distribuție spațială uniformă, constantă în timp și a cărei valoare o putem modifica, constatăm că, prin creșterea intensității cîmpului de la valoarea zero, profilul suprafeței libere se modifică continuu. Dacă la valori mici ale cîmpului magnetic, perturbațiile suprafeței sînt greu vizibile, acestea se evidențiază cu creșterea cîmpului magnetic, începînd de la o valoare a cîmpului numită cîmp critic. Creșterea cîmpului produce o perturbație vizibilă

în zona centrală a suprafeței, sub forma unui vîrf de lichid, înconjurat de alte șase vîrfuri, de înălțime mai mică, dispuse într-o formă hexagonală. Crescînd cîmpul în continuare, amplitudinea perturbației crește, iar cele mai multe vîrfuri se formează pînă la un nivel al cîmpului cu aproximativ 100% deasupra celui critic. Pînă la această valoare a cîmpului magnetic întreaga suprafață este acoperită cu vîrfuri, exceptînd o zonă îngustă din apropierea peretelui. Forma finală a perturbației are un remarcabil profil hexagonal. Cu creșterea cîmpului nu se mai sesizează schimbări în profilul perturbației, pînă la valori cu peste 400% peste valoarea cîmpului critic, la care profilul perturbației poate lua o formă pătratică. Configurația perturbației este foarte stabilă, cu aspect rigid. Dacă lichidul este ușor agitat, prin agitare vasului, configurația suprafeței se reformează imediat ce încetează agitația. Cînd cîmpul magnetic are o valoare suficient de mare, încît s-au format vîrfuri suficient de înalte, încercările de a le desprinde cu o lamă nemagnetică sînt zadarnice, lama trecînd pur și simplu prin ele, fără a modifica profilul perturbației. O încercare de a explica acest fenomen a fost făcută de J. R. Melcher în anul 1963, care a arătat că suprafața de separație dintre două medii fluide staționare, din care cel puțin unul este magnetizabil, poate fi perturbată cînd un cîmp magnetic constant este aplicat perpendicular la ea. Cînd interfața este perturbată, fluxul magnetic este concentrat în vîrfuri și apar astfel forțe care tind să amplifice perturbarea, în timp ce tensiunile de suprafață și forțele gravitaționale (cînd deasupra se află fluidul mai ușor) au o influență stabilizatoare, tinzînd să diminueze perturbarea.

Într-o experiență efectuată de M. D. Cowley și R. E. Rosensweig s-au folosit lichide magnetice ce au fost preparate prin măcinarea magnetitei în petrol, la care s-a adăugat 5,80% din greutate acid oleic. Lichidul magne-

tic obținut are densitatea $\rho=1\,475,5\text{ kg/m}^3$, tensiunea superficială $T=27,5\cdot 10\text{ N/m}^3$, la interfața cu aerul, susceptivitatea magnetică inițială este de $1,66\cdot 10^{-5}$. Supunând un vas de sticlă ce conține lichidul magnetic prezentat mai sus unui câmp magnetic normal la suprafață, au pus în evidență apariția perturbației suprafeței de separație cu aerul sub forma unor vîrfuri (fig. 12).

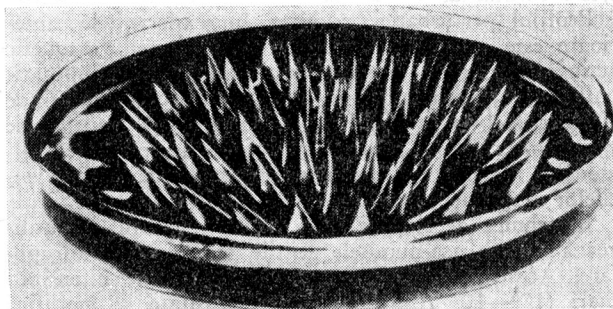


Fig. 12. Forma perturbației de suprafață a unui lichid magnetic supus acțiunii unui câmp magnetic perpendicular la suprafață.

La o valoare a câmpului magnetic peste valoarea critică, spațiul dintre vîrfuri a variat de la 12 la 9,5 mm pe toată suprafața perturbată.

Experiențe similare cu cele prezentate mai sus se pot face utilizînd un strat de apă distilată deasupra lichidului magnetic. Vom constata că profilul perturbației este același ca în experiențele anterioare. Deosebirea pe care o vom constata este referitoare la valoarea câmpului magnetic critic, care are o valoare dublă față de cazul anterior, cînd suprafața de separație era suprafața dintre lichidul magnetic și aer. Din această experiență rezultă că tensiunea superficială joacă un rol important în cadrul acestui fenomen. Cercetările efectuate asupra acestui fenomen au condus la un model

teoretic, după care distanțele dintre vîrfurile perturbațiilor sînt date de relația

$$l = K \sqrt{T/\Delta\rho},$$

unde T este tensiunea de suprafață la interfață, $\Delta\rho$ este diferența dintre densitatea celor două lichide și K este o constantă.

Profilul perturbației rezultată în experiențele anterioare este caracteristic cazului cînd cîmpul magnetic acționează normal la suprafața de separație, fiind atît uniform în spațiu cît și în timp. Pentru configurații de cîmp deosebite, profilul este deosebit. Să vedem, de exemplu, care este profilul suprafeței de separație a lichidelor magnetice în cazul configurației de cîmp a lentilelor magnetice cvadрупolare.

În tehnica accelerării și în fizica nucleară se utilizează curent așa-numitele lentile magnetice cvadрупolare. Acestea creează cîmpuri magnetice de intensități mari (10^6 — 10^7 A/m), a căror intensitate se modifică proporțional cu distanța la axa de simetrie a sistemului, conform relației $H = br$, unde r este distanța la axă, iar b este constanta sistemului de lentile. Dacă introducem un vas de sticlă cu lichid magnetic între pieșele polare ale unei astfel de lentile, se observă că, pentru cazul cîmpurilor mici, profilul suprafeței perturbate este asemănător unui paraboloid de rotație, spre deosebire de cazul cîmpurilor intense, cînd profilul suprafeței este asemănător unei suprafețe conice circulare. La un lichid magnetic cu magnetizația $M = 4 \cdot 10^4$ A/m, densitatea $\rho = 2 \cdot 10^3$ kg/m³, plasat într-un vas cu raza de 10 mm și o lentilă cvadрупolară cu constanta $b = 8 \cdot 10^3$ A/m², s-a obținut o înălțime a perturbației de 3 mm.

Mai există însă și alte configurații de cîmp care provoacă perturbația suprafeței plane a lichidelor magnetice? Răspunsul este da și reiese din experiențele urmă-

toare. Datorită unui câmp magnetic creat de o bandă conductoare rectilinie, prin care circulă curent electric, aflat în apropierea unui vas cu lichid magnetic, planeitatea suprafeței este perturbată. În apropierea benzii de curent lichidul ia forma unui plan înclinat putînd atinge un unghi de 87° pentru o bandă de 100 mm lățime (de grosime neglijabilă), cînd prin ea circulă un curent de 100 A. Pentru un punct situat la o depărtare mai mare de 100 mm de bandă, suprafața perturbată are forma de hiperbolă.

Înlocuind câmpul magnetic perturbator, creat de banda de curent, cu un câmp magnetic creat de o spirală, suprafața perturbată ia forma unui segment de elipsoid, dacă peste câmpul creat de spirală se suprapune un câmp magnetic paralel cu acesta, care să producă saturarea magnetică a lichidului.

Iată deci, că un câmp magnetic constant în timp poate produce perturbarea suprafeței de separație a unui lichid magnetic nu numai în cazul în care este orientat normal la suprafață. Care va fi însă comportarea suprafeței libere a unui lichid magnetic cînd asupra lui acționează un câmp magnetic variabil în timp? Asupra acestui aspect cercetările au fost inițiate de M. P. Perry și T. B. Jones, care au efectuat atît un studiu teoretic cît și unul experimental.

Să facem o experiență simplă: un miez de transformator, secționat transversal pe una dintre laturi încît să se creeze un întrefier de 3,2 mm, este bobinat pe latura opusă întrefierului cu circa 200 spire, alimentate cu o tensiune cu frecvența de 400 Hz. În întrefier se creează un câmp magnetic variabil în timp, în care plasăm lichidul magnetic. Dacă intensitatea câmpului este suficient de mare, planeitatea suprafeței de separație lichid-aer este ușor perturbată, sub forma unor unde, care se propagă la suprafața lichidului. Vom constata că amplitudinea oscilației suprafeței este funcție

atît de parametrii fizico-mecanici ai lichidului, cît și de valoarea cîmpului magnetic aplicat.

Din experiențele prezentate pînă aici rezultă că atunci cînd un cîmp magnetic de o valoare suficient de mare acționează asupra unui lichid magnetic static, acesta va produce perturbarea suprafeței lichidului, chiar dacă, pentru valori mici ale cîmpului, ea este aparent plană.

Ce se întîmplă însă în cazul în care lichidul magnetic, respectiv suprafața sa liberă, se găsește într-o stare dinamică? Răspunsul este: cîmpul magnetic este „adversarul” valurilor. Pentru a pune în evidență acest fenomen să facem următoarea experiență. Un vas nemagnetic de o formă dreptunghiulară este umplut, pe o înălțime de 15—20 mm, cu lichid magnetic. Cu ajutorul unui traductor de joasă frecvență, vasul este vibrat, încît suprafața liberă a lichidului este adusă într-o mișcare oscilatorie. Prin oscilarea cuvei la frecvențe convenabile, la suprafața lichidului apar oscilații care se propagă sub formă de unde, asemănător unor valuri, de o frecvență egală cu cea a traductorului. Asupra cuvei acționăm cu un cîmp magnetic constant, normal la suprafața lichidului, creat de un sistem de bobine Helmholtz, alimentat în curent continuu (fig. 13). La aplicarea cîmpului magnetic se constată că amplitudinea oscilațiilor de suprafață se micșorează, putîndu-se amortiza la o anumită valoare a cîmpului. Dacă se modifică frecvența de vibrație a cuvei, se constată că se formează din nou unde staționare la suprafață. Pentru o altă valoare a cîmpului magnetic, suprafața lichidului poate fi adusă din nou în stare statică.

Într-o altă experiență, sistemul de bobine care creează cîmpul magnetic este rotit cu 90° , încît cîmpul este orientat tangent la suprafața lichidului. În acest caz se constată că atunci cînd direcția cîmpului magnetic este coliniară cu direcția de propagare a undelor, crește viteza de propagare a acestora. Pentru o

valoare suficient de ridicată a cîmpului, și în acest caz, undele sînt amortizate. Cînd frecvența oscilatorului mecanic crește, undele apar din nou. Pentru această orientare a cîmpului magnetic se constată că frecvența de vibrație a cuvei, pentru care suprafața

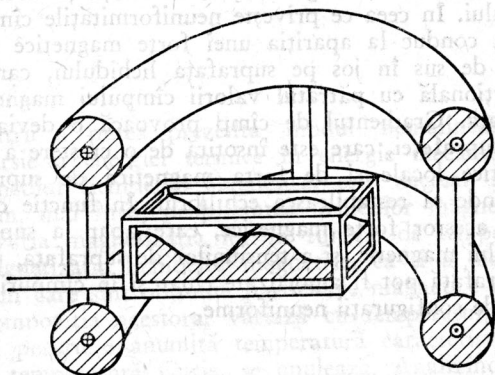


Fig. 13. Amortizarea undelor de la suprafața lichidului magnetic cu ajutorul unui cîmp magnetic perpendicular pe suprafață.

lichidului începe să oscileze, este mai mare decît în cazul experienței anterioare.

E.R. Zelazo și R.J. Melcher, procedînd la un studiu al interacțiunilor de la suprafață, au arătat în 1969 că, atît în cîmpuri magnetice uniforme cît și neuniforme, cuplajul magnetic al cîmpului magnetic cu lichidele magnetice omogene este limitat la suprafață. Astfel, a fost făcut studiul dinamicii și instabilității undelor în lichide magnetice neliniare, aflate în cîmpuri magnetice de orientare arbitrară, atît uniforme cît și neuniforme. În acest fel, s-a putut distinge clar în compor-

tarea lichidelor magnetice rolul neomogenităților lichidelor magnetice, cât și rolul neuniformității câmpului magnetic aplicat. Utilizînd diverse lichide magnetice, ei au arătat că frecvența de rezonanță este dependentă de caracteristicile fizico-magnetice ale lichidului. Ea crește cu creșterea magnetizației, densității și viscozității lichidului. În ceea ce privește neuniformitățile câmpului, acestea conduc la apariția unei forțe magnetice superficiale de sus în jos pe suprafața lichidului, care este proporțională cu pătratul valorii câmpului magnetic la suprafață. Gradientul de câmp provoacă o deviație în sus a suprafeței, care este însoțită de o creștere a forței magnetice locale și de forța magnetică de suprafață, care tinde să restabilească echilibrul. În funcție de valoarea acestor forțe magnetice, care apar la suprafața lichidului magnetic, și a tensiunilor de suprafață, unde de suprafață pot fi amortizate chiar și în câmpuri magnetice de configurații neuniforme.

7. LICHIDELE MAGNETICE ȘI CONVERSIA DE ENERGIE

Pentru a putea prezenta modul nemaîîntîlnit de conversie a energiei termice în energie mecanică prin intermediul lichidelor magnetice, este necesar să prezentăm, mai întîi, proprietatea lichidelor magnetice de a-și varia magnetizația lor în funcție de temperatură.

Magnetizația lichidelor magnetice, ca și a materialelor din care sînt obținute particulele magnetice ce intră în compoziția acestora, variază cu temperatura, astfel încît, pentru o anumită temperatură caracteristică, numită temperatură Curie, se anulează. Analizînd variația magnetizației cu temperatura pentru cîteva ferite folosite la prepararea lichidelor magnetice, se observă la feritele de mangan-zinc importante caracteristici de a-și modifica rapid magnetizația în funcție de temperatură (coeficientul piromagnetic relativ mare) și de a pierde proprietățile magnetice la temperaturi relativ joase, adică ele au punctul Curie în jur de 120°C .

Conversia energiei termice în energie mecanică cu ajutorul lichidelor magnetice se bazează pe două fenomene și anume:

- modificarea termenului presiune este determinată de modificările termenului magnetic din ecuația lui Bernoulli;

- variația magnetizației lichidelor magnetice cu temperatura.

Să descriem o experiență simplă din care să rezulte principiul acestei transformări.

Considerăm o conductă prin care circulă un lichid magnetic, în interiorul căreia este prezent un câmp magnetic intens, creat de o bobină coaxială cu conducta, aranjamentul fiind astfel conceput încât în zona de câmp

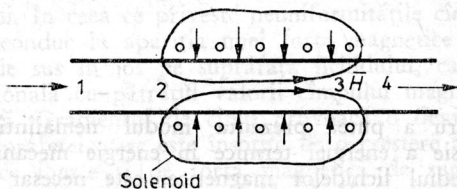


Fig. 14. Principiul conversiei de energie folosind lichide magnetice.

să se asigure încălzirea lichidului magnetic (fig. 14). În figură se observă patru zone distincte în care avem îndeplinite următoarele condiții de temperatură și câmp:

$$T_1 = T_2 = T_i \quad \text{și} \quad H_1 = H_4 = 0;$$

$$T_3 = T_4 = T_f \quad \text{și} \quad H_2 = H_3 = H,$$

unde $T_f > T_i$, acestea fiind temperaturile inițiale și finale ale lichidului. Ecuația lui Bernoulli aplicată în zonele 1 și 2 ia forma

$$p_2 - p_1 = \mu_0 \int_0^H M(H, T_i) dH,$$

iar în zonele 3 și 4

$$p_4 - p_3 = -\mu_0 \int_0^H M(H, T_f) dH,$$

în toate zonele lichidului avînd aceeași viteză v și aceeași înălțime h . Ecuația lui Bernoulli aplicată în zonele 2 și 3 dă $p_2 = p_3$. Combinînd cele trei relații se obține

$$\Delta p = p_4 - p_1 = \mu_0 \int_0^H [M(H, T_i) - M(H, T_f)] dH.$$

Cu alte cuvinte, datorită mișcării lichidului în cîmp magnetic rezultă o creștere a presiunii, a cărei valoare este dată de relația de mai sus. Creșterea de presiune Δp , în cazul în care lichidul este saturat magnetic, la un cîmp magnetic mai mic decît cel dat de bobină, se poate scrie

$$\Delta p = \mu_0 H \Delta M = \mu_0 H (M_2 - M_1).$$

Acest sistem funcționează ca o pompă magneto-calorică. Pompa conține deci un cîmp magnetic și o sursă de căldură. Sub acțiunea cîmpului magnetic lichidul este atras spre pompă, unde este încălzit de către sursa de căldură pînă la o temperatură la care magnetizația ajunge la valori mult mai mici, acest fapt întîmplîndu-se, în general, în apropierea temperaturii Curie. Lichidul aflat în afara pompei, la temperatură mai joasă, cu magnetizația mai mare, este atras în pompă de cîmpul magnetic, iar lichidul încălzit este pompat afară din pompă de către lichidul care intră. Creșterea de presiune Δp care apare face ca lichidul magnetic să se autopompeze, transformînd energia termică a sursei de căldură în energie mecanică de mișcare.

Ciclul de conversie magnetocaloric, bazată pe principiul descris mai înainte, prezintă o analogie cu acel al termosifonului, bine cunoscut în instalațiile de încălzire centrală. O instalație magnetocalorică de conversie ciclică a energiei este prezentată în figura 15. Prin încălzirea lichidului magnetic, permeabilitatea sa magnetică se micșorează, astfel încît el este dirijat spre

zonele de inducție magnetică mică (în afara zonei de acțiune a câmpului magnetic). Acolo el se răcește, permeabilitatea lui crește și se întoarce spre zonele de inducție mare, adică spre electromagnet. În cursul traiectoriei sale în circuit, lichidul magnetic poate acționa

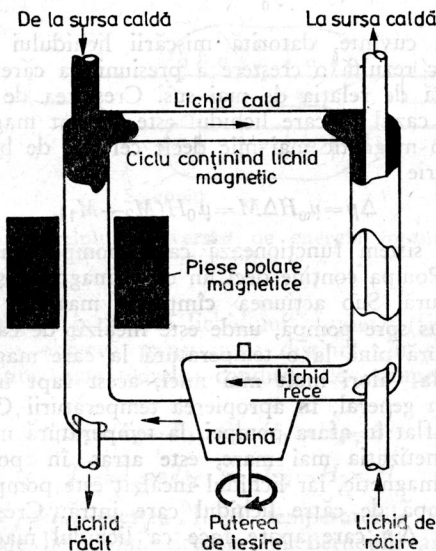


Fig. 15. Instalația magnetocalorică de conversie ciclică a energiei.

o turbină și, în acest fel, căldura se transformă în lucru mecanic.

Această metodă de conversie ferohidrodinamică de energie prezintă avantajul unui excelent raport al puterii utile la masa sistemului, o durată lungă de viață

și o bună fiabilitate datorită inexistenței pieselor mecanice în mișcare. Prin folosirea unei încălziri regenerative, eficiența unui astfel de sistem poate fi mărită mult, din punct de vedere teoretic, la mai mult de 80% din limita ciclului Carnot.

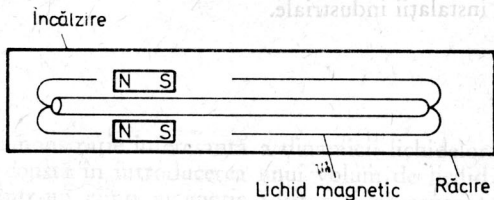


Fig. 16. Autopomparea lichidului magnetic într-o conductă termică.

Dar această descoperire este ținută încă pe loc, pentru un oarecare timp, de două obstacole: a) punerea la punct a unui lichid magnetic metallic, realmente utilizabil, ca de exemplu mercur-fier; b) necesitatea de a utiliza un magnet supraconductor.

Fenomenul de autopompăare a lichidului magnetic poate fi folosit și la proiectarea conductelor termice. Figura 16 reprezintă de fapt o conductă termică cu lichid magnetic. Cele două capete ale conductei sînt puse în contact cu cele două surse de căldură. În interiorul tubului lichidul se autopompează și transportă căldura de la sursa caldă la sursa rece. Eficiența unei asemenea conducte termice depinde de dependența magnetizației lichidului de temperatură, de conductibilitatea termică a lichidului și de concentrația volumetrică a particulelor magnetice din lichid. Ca lichid de bază se poate folosi mercurul, iar ca material magnetic sînt indicate particulele de aliaje nichel-fier, care au temperatura Curie apropiată de temperatura camerei. Dacă

magnetul ar fi înlocuit cu un electromagnet, se poate controla închiderea sau deschiderea conductei termice.

Această tehnică, a conversiei energiei calorice în energie mecanică, este proprie lichidelor magnetice, cu ajutorul cărora se întrevide soluționarea problemelor privind utilizarea căldurii reziduale ce apare într-o serie de instalații industriale.

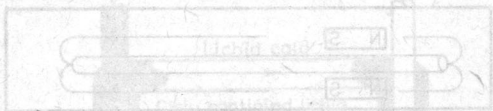


Fig. 16. Autoimpulparea lichidului magnetic la o conductă termică.

Întar această descoperire este faptul înlocuirea unui, un oricare timp de două obstacole: a) pământ la punct a unui lichid magnetic metalic, tratamente utilizabil, ca de exemplu mercur-lit; b) necesitatea de a utiliza un magnet supraconductor.

Fenomenul de autoimpulpare a lichidului magnetic poate fi folosit în proiectarea conductelor termice. Figura 16 reprezintă de fapt o conductă termică cu lichid magnetic. Cele două capete ale conductei sunt puse în contact cu cele două surse de căldură. În interiorul tubului lichidul se autoimpulpează și transportă căldura de la sursa caldă la sursa rece. Lichidul magnetic conductiv termic depinde de dependența magnetică a lichidului de temperatură, de conductibilitatea termică a lichidului și de concentrația volumetrică a particulelor magnetice din lichid. Ca lichid de bază se poate folosi mercurul sau material magnetic. Lichidul este încălzit de sursa caldă și se contractă, iar particulele de aliaje nichel-fier și altele se contractă. Dacă

8. ROTIREA LICHIDELOR MAGNETICE

O demonstrație interesantă a dinamicii lichidelor magnetice constă în introducerea unui volum de lichid magnetic într-un câmp magnetic rotitor și observarea comportării lui. Se constată că lichidul magnetic execută o mișcare de rotație, avînd viteza unghiulară de rotație mai mică decît viteza cîmpului magnetic rotitor, mișcarea executîndu-se în același sens sau în sens contrar după cît de intens este cîmpul magnetic.

Această comportare curioasă a unui lichid a fost observată prima dată în anul 1939 de către cercetătorul sovietic V.N. Tvetkov, care a constatat că o substanță diamagnetică lichidă, introdusă într-un câmp magnetic rotitor, este antrenată într-o slabă mișcare de rotație. Un efect mult mai intens se constată în cazul lichidelor magnetice, datorită structurii lor bifazice. Acest fenomen observat la lichidele magnetice de către R. Moscovitz și R.E. Rosensweig în anul 1967, se datorește momentelor magnetice mari ale particulelor ce alcătuiesc faza solidă și care „urmăresc” direcția cîmpului (fig. 17). Astfel, rotirea cîmpului determină rotirea particulelor magnetice. Această mișcare, datorită dimensiunilor foarte mici ale particulelor, nu este vizibilă, avînd loc la o scară microscopică. Însă, datorită comportării ca un mediu continuu, omogen, faza lichi-

dă nu rămîne în repaus, ci, prin intermediul agentului stabilizant de legătură cu faza solidă, datorită cuplului de frînare vîscoasă, este antrenată și ea într-o mișcare de rotație. Are loc, în acest fel, transformarea mișcării microscopice de rotație într-o mișcare macroscopică, vizibilă.

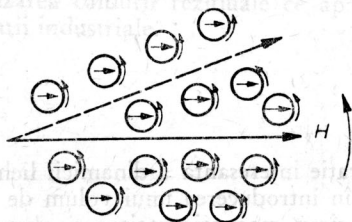


Fig. 17. În cîmp magnetic rotitor, particulele din suspensie tind să urmărească direcția cîmpului magnetic.

Punerea în evidență a acestui fenomen este la îndemîna tuturor cititorilor pasionați în lucrări de laborator. Pentru o experiență ce are ca subiect acest fenomen, este utilizat un lichid magnetic (preparat după rețetele prezentate în paragraful 2 și care constă, de exemplu, dintr-o suspensie stabilizată de particule subdomenice de magnetită (Fe_3O_4)) și un cîmp magnetic rotitor. Cîmpul magnetic rotitor poate fi obținut prin dispunerea a două perechi de bobine Helmholtz într-o configurație ortogonală și alimentarea lor prin circuite separate de la același generator. Este necesar ca bobinele să fie parcurse de curenți de aceeași frecvență, dar defazați cu $\pi/2$. Alimentarea în domeniul frecvențelor scăzute dă posibilitatea obținerii, după amplificare, a unor curenți într-un domeniu larg de valori. Pentru improvizarea unei experiențe mai simple, se poate folosi cîmpul magnetic rotitor creat de statorul unui motor asincron cu bobinaj trifazic.

Dacă un pahar, conținând lichid magnetic, este așezat coaxial, în interiorul statorului, în momentul aplicării câmpului magnetic rotitor, se constată antrenarea volumului total de lichid magnetic într-o mișcare de rotație, ca răspuns la aplicarea acestui câmp, generat în momentul alimentării statorului.

Acest fenomen a constituit obiectul de cercetare a mai multor colective de cercetare din diverse țări ca S.U.A., U.R.S.S., Franța, România etc., constituind un subiect de controversă în ceea ce privește cauzele și modul de antrenare în mișcarea de rotație a volumului total de lichid magnetic. Studiile efectuate au scos în evidență complexitatea acestui fenomen, demn de elevat. O primă încercare de explicație teoretică a fenomenului de rotație a lichidelor magnetice într-un câmp magnetic rotitor a fost făcută în anul 1967 de către R. Moskowitz și R.E. Rosensweig. Ei au arătat că într-un câmp magnetic rotitor, constant ca mărime, mecanismul de antrenare a lichidelor magnetice este dat de cuplul dipolar exercitat asupra fiecărei particule din suspensie. Cuplul magnetic tinde să aducă particulele din suspensie într-o mișcare de rotație în sincronism cu mișcarea câmpului, în scopul micșorării unghiului de întârziere φ dintre direcția momentului magnetic al particulelor și direcția câmpului. Asupra particulelor acționează însă un cuplu de frînare vîscoasă, proporțional cu viteza unghiulară de rotație a particulelor, menținând un unghi de întârziere diferit de zero. Cuplul vîscos acționează asupra mediului de dispersie, inducînd vârtejuri locale, ce se formează la scară microscopică. Sumarea acestor mișcări microscopice se manifestă printr-o mișcare macroscopică, vizibilă în tot volumul de lichid magnetic. Experimental s-a constatat că viteza unghiulară de rotație a volumului de lichid magnetic

depinde de amplitudinea și frecvența câmpului magnetic sub forma

$$\omega = K\nu H,$$

unde K este o constantă ce depinde de caracteristicile particulelor magnetice și ale mediului de dispersie, iar ν este frecvența de rotație a câmpului magnetic de intensitate H . Prin variația parametrilor ν și H au fost obținute experimental viteze mai mari de 200 rotații/minut, fără să se fi ajuns la limita superioară posibilă.

Cercetătorii sovietici Zaițev și Sliomis, în 1969, și cercetătorii francezi Mailfert și Martinet, în 1972, au arătat că în timpul rotirii particulelor magnetice din suspensie sub acțiunea unui câmp magnetic rotativ (cu o distribuție spațială uniformă), fiecare particulă se rotește cu aceeași viteză unghiulară ω . Datorită cuplului vâscos, particulele antrenează într-o mișcare de rotație mediul de dispersie din vecinătatea lor. Apar astfel vârtejuri microscopice care nu depășesc distanța dintre două particule. Rotația macroscopică a lichidului magnetic este dată de suma tuturor acestor vârtejuri individuale. Dacă câmpul magnetic uniform are o distribuție spațială uniformă și lichidul magnetic este din toate punctele de vedere omogen, între vârtejuri există o compensare exactă, astfel încât suma acțiunii lor este egală cu zero. Deci, un lichid magnetic perfect omogen nu ar trebui să fie rotit de un câmp magnetic rotitor uniform.

Deoarece lichidele se află în vase, apare efectul de perete, caz în care frecarea nu este aceeași pe ambele părți ale particulelor, sau a vârtejurilor asociate lor. Astfel, cu cât frecarea este mai mare spre centru, unghiul de întârziere crește, obținându-se o rotație macroscopică în sensul de rotație a câmpului magnetic, convențional, denumită o rotație pozitivă.

Un model hidrodinamic este prezentat în figura 18, unde vitezele relative ale vârtejului (1), față de mediul de dispersie, sînt v în A și $2v$ în B . Frecările pe cele două părți sînt diferite și vârtejul (1) alunecă cu viteza v_1 . Aceasta modifică echilibrul vitezelor pentru vârtejul (2) încît se obține $(2v - v_1)$ în B și $2v$ în C , ceea ce face ca vârtejul (2) să alunece și el cu viteza v_2 . Apare în acest caz un efect de ordin secund, încît pentru vârtejul (1), vitezele sînt $(2v + v_1)$ în A și $(2v - v_1 + v_2)$ în

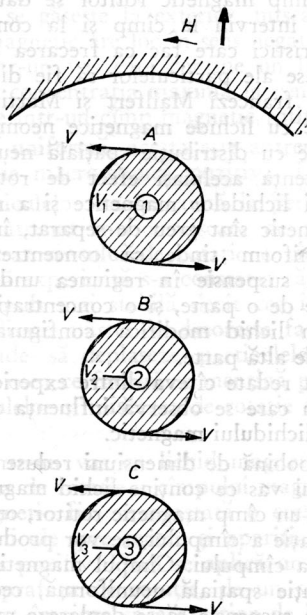


Fig. 18. Modelul hidrodinamic de antrenare a lichidului magnetic într-un câmp magnetic rotitor.

B, așa încît vârtejul (1) alunecă cu viteza $(v_1 + \delta v_1)$, iar vârtejul (2), cu viteza $(v_2 + \delta v_2)$. Acest proces consecutiv, condus pînă la ordine înalte, face ca vârtejul (1) să alunece cu viteza $(v_1 + \delta v_1 + \delta v'_1 + \delta v''_1 + \dots)$, iar vârtejul (2) cu viteza $(v_2 + \delta v_2 + \delta v'_2 + \dots)$ și așa mai departe. Rezultatul final este o rotație macroscopică a lichidului magnetic în sens pozitiv, viteza de rotație descrescînd de la perete spre centrul vasului.

Ca urmare, fenomenul de rotație a lichidelor magnetice într-un cîmp magnetic rotitor se datorește neomogenităților ce intervin la cîmp și la compoziția lichidului, caracteristici care fac ca frecarea pe două părți diametral opuse ale particulelor să fie diferită.

Cercetătorii francezi Mailfert și Martinet au imaginat experiențe cu lichide magnetice neomogene în cîmpuri magnetice cu distribuție spațială neuniformă și au observat existența aceluiași efect de rotație. Efectele neomogenității lichidelor magnetice și a neuniformității cîmpului magnetic sînt greu de separat, întrucît cîmpul magnetic neuniform tinde să concentreze particulele magnetice din suspensie în regiunea unde cîmpul este mai intens, pe de o parte, și o concentrație de particule neuniformă în lichid modifică configurația locală a cîmpului, pe de altă parte.

Mai jos sînt redată cîteva dintre experiențe imaginate și realizate, în care se observă influența neomogenității cîmpului și a lichidului magnetic.

a) Dacă o bobină de dimensiuni reduse este introdusă în centrul unui vas ce conține lichid magnetic, și acesta se găsește într-un cîmp magnetic rotitor, omogen, coaxial cu axa de rotație a cîmpului, se vor produce perturbații în configurația cîmpului. Cîmpul magnetic ce se obține are o distribuție spațială neuniformă, ceea ce face ca particulele din suspensie să se deplaseze radial spre centrul vasului, unde intensitatea cîmpului este mai mare. În acest caz, tot volumul de lichid este antrenat într-o

mișcare de rotație macroscopică, în sens pozitiv (același cu sensul de rotație a câmpului magnetic). S-a constatat că, cu cât gradientul de concentrație este mai mare, cu atât viteza unghiulară de rotație este mai mare.

b) În cazul în care vasul este umplut cu două lichide nemiscibile, unul magnetic și celălalt nemagnetic, configurația fiind sub formă de inele concentrice, cel nemagnetic la exterior și cel magnetic la centru, volumul de lichid magnetic este antrenat într-o mișcare macroscopică de rotație în sens pozitiv. În cazul în care lichidul magnetic se găsește la exterior, mișcarea de rotație a lichidului magnetic are loc în sens negativ.

c) Dacă într-un vas care conține un lichid magnetic neomogen, cu concentrația maximă la centrul vasului, și care se găsește într-un câmp magnetic rotitor cu o distribuție spațială uniformă, acesta este antrenat într-o mișcare de rotație macroscopică pozitivă. Dacă însă concentrația particulelor este maximă la pereții vasului, lichidul este antrenat într-o mișcare de rotație în sens negativ (contrar sensului de rotație a câmpului magnetic). În această experiență s-a constatat că rotirea în sens negativ este mult mai stabilă decât cea în sens pozitiv. Această stabilitate mărită se datorește faptului că forța centrifugă tinde să deplaseze particulele de la centru spre exterior, ceea ce face să se mențină profilul concentrației particulelor și mișcarea de rotație să se autostabilizeze.

d) Dacă într-un vas cu lichid magnetic se introduce coaxial cu axa de rotație a câmpului magnetic rotitor un corp feromagnetic fix, se constată o creștere a concentrației de particule spre centru și apariția unei puternice rotații în sens pozitiv. Dacă se aplică un câmp magnetic normal la suprafața de rotație, de un sens convenabil, particulele sînt împinse spre exterior de la centru și rotația este inversată, avînd acum loc în sens negativ. Apoi, dacă se inversează sensul câmpului magnetic verti-

cal, particulele sînt atrase din nou spre centru, generîndu-se o rotație pozitivă foarte puternică.

e) Dacă se utilizează un lichid magnetic neomogen, constituit dintr-o suspensie de particule magnetice de magnetită (Fe_3O_4) cu diametrul de 200 Å, amestecate cu particule ce au diametrul de 1 000 Å în petrol, stabilizate cu acid oleic, se constată că în momentul aplicării cîmpului magnetic rotitor, lichidul magnetic este antrenat într-o mișcare de rotație de sens negativ. Crescînd valoarea intensității cîmpului magnetic rotitor se constată că viteza de rotație a lichidului crește pînă la o valoare maximă, după care începe să scadă și, la o anumită valoare a intensității cîmpului magnetic rotitor, să-și schimbe sensul de rotație în sens pozitiv. Crescînd în continuare intensitatea cîmpului magnetic, lichidul ce se rotește acum în sens pozitiv își va crește din nou viteza atîngînd o viteză mai mare decît viteza maximă în sens negativ. Apoi, fenomenul descris anterior se repetă avînd loc o nouă schimbare de sens.

Deci, dacă cîmpul magnetic în mișcare de rotație își păstrează același sens, lichidul magnetic are, periodic, sensuri diferite de rotație. Atît cîmpul magnetic cît și lichidul magnetic au „drumuri” proprii.

f) Cînd lichidul magnetic este omogen, iar în centrul vasului în care se găsește lichidul magnetic se introduce un cilindru dintr-un material dielectric, se constată că acesta, la aplicarea cîmpului magnetic rotitor, are același sens negativ de rotație cu a lichidului magnetic, pe care îl păstrează la orice valori ale cîmpului.

De asemenea, cînd un vas nemagnetic, cum ar fi un vas de sticlă, ce conține o anumită cantitate de lichid magnetic, este suspendat cu un fir de ață, într-un cîmp magnetic rotitor, acesta începe să se rotească în sensul cîmpului, iar lichidul în sens contrar. Vasul își păstrează tot timpul același sens de rotație indiferent de valoarea cîmpului. Kagan și Rîkov dau o explicație calitativă

acestor fenomene arătînd că într-un câmp magnetic rotitor fiecare particulă se rotește tot timpul în sensul de rotație al câmpului magnetic și prin interacțiune cu perețele vasului sau cu suprafața corpurilor scufundate în lichidul magnetic, particulele în rotație, datorită viscozității lichidului, transmit acestora o parte din energia lor și, ca urmare, acestea încep să se rotească într-un sens dat de suprafața pe care are loc interacțiunea cu particulele magnetice din suspensie, exterioară sau interioară. În cazul de față, frecarea dintre particulele magnetice în rotație și cilindrul cufundat în lichid este în măsură să-l antreneze într-o mișcare de rotație, transmitînd o parte din energia câmpului magnetic asupra cilindrului dielectric.

g) Într-o altă experiență s-a constatat că într-un câmp magnetic rotitor, cu o distribuție spațială uniformă, un lichid magnetic cu concentrația de particule uniformă este antrenat într-o mișcare de rotație dacă în interiorul lui se creează un gradient de viscozitate (variația viscozității pe direcția razei). Acest lucru se poate realiza experimental prin introducerea în centrul vasului cu lichid magnetic omogen, care se găsește în câmp magnetic rotitor și uniform, a unui corp cu temperatură ridicată, care creează și menține un gradient de temperatură de cel puțin 100 grade pe centimetru de lungime, ceea ce determină apariția unui gradient de viscozitate, deci de neomogenitate a lichidului și deci o rotație a lui.

Pe baza formelor de antrenare a lichidelor magnetice într-o mișcare de rotație poate fi imaginată o gamă largă de aplicații. De exemplu, poate fi construit un motor cu lichid magnetic a cărui rotor să se rotească în sens contrar câmpului magnetic rotitor. Acesta poate fi adoptat pentru sistemele de comenzi automate, în suplimentarea motoarelor asincrone obișnuite, pentru cupluri de forțe nu prea mari.

9. LICHIDELE MAGNETICE — SURSE ACUSTICE

Fenomenele noi, proprii lichidelor magnetice, fac posibilă utilizarea acestora în cele mai diverse ramuri ale științei. Pare surprinzătoare, și totuși reală, afirmația că lichidele magnetice pot fi utilizate ca surse acustice.

Dar să urmărim o experiență ce vine în sprijinul afirmației făcute anterior, experiență propusă de Cary și Fenlon în 1968. Un container cilindric conține un lichid magnetic care este în echilibru hidrostatic cu apa înconjurătoare (fig. 9). Lichidul magnetic utilizat, care are densitatea mai mică decât densitatea apei înconjurătoare este în contact direct cu apa numai la partea inferioară, lateral fiind separată de aceasta prin pereții containerului nemagnetic. Când aplicăm un gradient de câmp în direcția negativă a axei z , pistonul de lichid se va de-

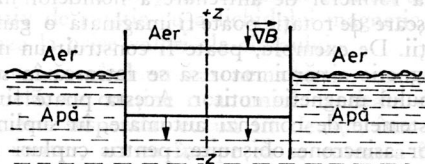


Fig. 19. Comportarea pistonului de lichid magnetic ca transductor magneto-acustic.

plasa în jos într-o altă poziție de echilibru hidrostatic, forța magnetică care a apărut prin aplicarea câmpului fiind echilibrată de forța de împingere în sus a apei. O mișcare oscilatorie a pistonului de lichid poate fi obținută prin inversarea periodică în timp a direcției gradientului de câmp. În felul acesta, lichidul magnetic are o comportare asemănătoare unui traductor magneto-acustic. Teoria arată că valoarea constantei de cuplaj a unui asemenea piston cu lichid magnetic este de același ordin de mărime cu cea a materialelor magnetostrictive convenționale ca nichelul, permaloyul și alferul. Teoria arată că la un câmp magnetic static de $32 \cdot 10^4$ A/m și un gradient de câmp de $8 \cdot 10^6$ A/m² se poate obține o eficiență mai mare decât a materialelor solide feromagnetice. Mai mult, există posibilitatea de a crește valoarea constantei de cuplaj prin aplicarea unui gradient mai mare de câmp sau prin creșterea înălțimii pistonului de lichid magnetic. Deoarece dipolii magnetici (particulele monodomeniale din lichid) sînt aliniați perfect, problema pierderilor dielectrice prin relaxarea magnetică nu apare, ceea ce face ca lichidele magnetice să fie extrem de competitive în comparație cu materialele convenționale, peste frecvența de 80 kHz. În plus, la acest avantaj se adaugă capacitatea lichidelor magnetice de a rezista la șocuri. Lichidele magnetice au, de asemenea, posibilitatea de a lua forma oricărui vas, ceea ce va da mai mari posibilități la proiectare decât există în mod curent pentru dispozitivele convenționale magnetostrictive și piezoelectrice.

Într-o altă variantă, Baștovoi și Krakov au ajuns la concluzia că folosind un lichid magnetic supus la un câmp magnetic variabil în spațiu și timp se pot genera sunete, adică are loc transformarea energiei câmpului magnetic în energie sonoră. Neuringer și Rosensweig au demonstrat că într-un câmp magnetic neuniform, în lichidul magnetic, presiunea este mai mare în acele zone

în care câmpul magnetic este mai intens. Dacă valoarea câmpului magnetic H este o funcție periodică de spațiu, atunci în lichidul magnetic ia naștere o distribuție periodică a presiunii. Dacă câmpul magnetic are și o variație periodică în timp, atunci presiunea devine o funcție periodică de timp și de spațiu. Un astfel de câmp este numit câmp alergător. Un lichid magnetic, care se găsește într-un câmp magnetic alergător, va suferi comprimări periodice în spațiu și timp, care nu reprezintă altceva decât unde sonore forțate. Dacă frecvența și faza forței magnetice, creată de gradientul de câmp, coincid cu frecvența și faza undelor sonore libere, excitarea lor cu un câmp magnetic alergător va da un fenomen de rezonanță. Deci, dacă în fiecare punct, frecvența și faza unei sonore libere coincid cu frecvența și faza forței, se creează condiții favorabile pentru pătrunderea în sistem a energiei de la sursa unui câmp magnetic alergător și astfel energia câmpului magnetic se transformă, prin acest traductor, în energie sonoră. Deci, se poate afirma că lichidele magnetice folosite în anumite condiții apar ca o alternativă reală și avantajoasă pentru construcția senzorilor magneto-acustici, mai ales acolo unde materialele piezoelectrice și piroelectrice suferă deteriorări.

10. LUBRIFIANȚI MAGNETICI ?

Ce este un lubrifiant magnetic? Un lubrifiant magnetic este o nouă denumire, care se referă la o nouă clasă de lubrifianți și care, în afara calităților lor de lubrifiere, au în plus proprietăți magnetice, încât pot fi controlate cu ajutorul unui câmp magnetic.

Practica a arătat că multe tipuri de lubrifianți, incluzînd hidrocarburile sintetice, diesterii, fluoroesterii și uleiurile petroliere pot fi transformate în lubrifianți magnetici. Aceasta se realizează prin dispersarea unor particule magnetice de dimensiuni subdomenice (cu diametrul de circa 100 Å), stabilizate cu un agent stabilizant, într-unul din lubrifianții clasici amintiți mai sus. Lubrifianții magnetici pot fi controlați magnetic cu un simplu magnet sau electromagnet cu o structură convenabilă a câmpului, astfel încât ei pot fi poziționați exact, cînd și unde este necesar, la punctul de contact dintre părțile în mișcare și cele statice. Din cauză că lubrifiantul magnetic este folosit numai la punctul de contact, este necesară o cantitate redusă de lubrifiant. Un lubrifiant magnetic poate, de asemenea, elimina pompele necesare pînă acum pentru circulația uleiului.

A apărut întrebarea dacă în procesul de lubrifiere cu lichide magnetice, particulele magnetice solide nu produc uzura suprafețelor în contact. Răspunsul este dat de

testările de ungere și de uzură care au arătat echivalența uleiului magnetic cu uleiul de bază, iar nemăritarea gradului de uzură la lichide magnetice se datorește, în primul rând, dimensiunilor ultramicroscopice ale particulelor suspendate și, în al doilea rând, stratului monomolecular de stabilizant ce învelește particulele, strat ce contri-

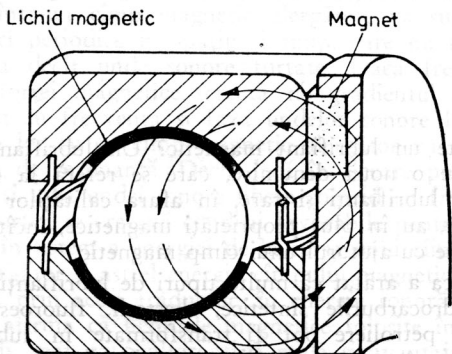


Fig. 20. Dispunerea lubrifiantului magnetic la ungerea unui rulment.

buie la micșorarea uzurii. În plus, are loc o micșorare a uzurii datorită menținerii pe cale magnetică a uleiului magnetic exact în punctele de contact ale pieselor în mișcare relativă. Un exemplu de folosire a lubrifiantilor magnetici la ungerea rulmenților este dat în figura 20, unde câmpul magnetic este generat de un magnet permanent de formă cilindrică, încadrat în cămașa rulmentului. Liniile de forță ale câmpului magnetic se închid prin punctele de contact ale elementelor de rulare și plasează lubrifiantul magnetic chiar în locul unde este strict necesar, prevenind astfel pierderile de lubrifiant datorită forțelor gravitaționale sau centri-

fugale. Un alt exemplu de lubrifiere magnetică a rulmenților se face prin înlocuirea roților, în parte sau în întregime, cu mici magneți permanenți. Fiecare rolă magnetică reține uleiul magnetic și menține un strat subțire de lubrifiant între el și elementele cu care vine în contact. Acestea sînt însă numai două exemple din multitudinea posibilităților de utilizare a lichidelor magnetice drept lubrifianți.

Dar, pentru început, se constată un neajuns al folosirii lubrifiantilor magnetici, datorită atracției particulelor magnetice din spațiul înconjurător în zona de lubrifiere. Întrucît pilitura de fier are permeabilitatea mai mare decît a lichidului, ea are tendința să îndepărteze lichidul și să pătrundă în zona de contact. Dacă particulele magnetice din spațiul înconjurător sînt suficient de mici în mărime, ele pot fi captate în lichid. Ca urmare, folosirea lichidelor magnetice trebuie făcută cu grijă pentru a nu permite particulelor mari de fier să pătrundă în zona de lubrifiere. În ceea ce privește particulele nemagnetice, ele au tendința de a fi îndepărtate din lichidul magnetic datorită fenomenului de levitație magnetică a corpurilor nemagnetice.

11. TRANSPARENTA UNUI LICHID MAGNETIC

Este la îndemîna oricărui cititor pasionat de practica experimentală să constate că un lichid magnetic diluat este transparent pentru radiațiile electromagnetice, cum ar fi lumina albă. Pentru prima dată, Berger și colaboratorii săi au observat că lichidele magnetice au capacitatea de a-și modifica „transparenta” sub acțiunea unui câmp magnetic continuu sau alternativ. O caracteristică importantă a acestui fenomen se datorește faptului că transmisia luminii este puternic influențată de câmpurile magnetice foarte slabe. De exemplu, un lichid magnetic ce conține $3,4 \cdot 10^{-5}$ g/cm³ particule solide de fier, cu dimensiunile medii de aproape 0,1 μ m, prezintă un efect de modulare a intensității luminoase, a unui fascicul luminos, paralel cu câmpul magnetic de comandă, conform cu datele de mai jos:

Câmpul magnetic în direcția fascicului luminos (A/m)	Intensitatea luminii (unități arbitrare)
0	1
80	1,12
160	1,22
240	1,33

Într-o experiență simplă, s-a constatat că în cazul utilizării pentru modulare a semnalelor periodice o eficiență sporită este obținută prin folosirea unui câmp magnetic de polarizare. În general, intensitatea câmpului magnetic de polarizare este de același ordin de mărime cu cea a câmpului de comandă. Cercetări sistematice au arătat legătura dintre direcția câmpului polarizant, cea a câmpului de excitație și cea a fasciculului luminos. Situația optimă găsită este pentru cazul în care câmpul polarizant este perpendicular la câmpul de excitație și ambele câmpuri fac un unghi de 45° cu direcția fasciculului luminos. De asemenea, s-a observat că particulele coloidale orientate paralel cu fasciculul luminos sporesc transmiterea luminii, în timp ce cele orientate perpendicular la fasciculul luminos atenuează transmiterea luminii. Concentrația particulelor de material feromagnetic în suspensie și forma particulelor au un efect puternic asupra modulării transmisiei luminii. Lucrând cu trei tipuri de lichide magnetice: *A* — în care particulele sînt independente în soluție, *B* — în care particulele formează lanțuri mici și *C* — în care particulele formează lanțuri lungi, s-a constatat că cea mai puternică atenuare o prezintă lichidul *B*, ceea ce face să se creadă că difuzia maximă are loc aici, dat fiind că lungimea particulelor este de același ordin de mărime cu lungimea de undă a radiației transmise.

Pe baza acestui fenomen se pot construi celule de transmisie modulată a luminii. Ele constau dintr-un tub cilindric, cu pereții nemagnetizabili și cu capetele din sticlă. Celula este umplută cu un lichid magnetic diluat atît încît să fie capabil să transmită lumina. Un solenoid este bobinat pe tubul respectiv, iar deasupra acestuia se găsește un magnet bară, de polarizare, care creează un câmp magnetic paralel cu fasciculul luminos prin celulă. Cu o astfel de celulă se poate construi un ansamblu de emisie-recepție a semnalelor audio, avînd

ca unde purtătoare unde luminoase. O schemă de principiu a unui astfel de aparat, care funcționează pe baza acestui fenomen, este prezentat în figura 21. Aparatul este compus din două subansamble: de emisie și de recepție. Subansamblul de emisie cuprinde un microfon, 1, un amplificator de putere, 2, și celula 3, care conține lichidul magnetic. Solenoidul celulei este alimentat de amplificatorul de putere cu semnalul care trebuie transmis. Sursa de lumină 4 poate fi o lampă cu fascicul paralel sau laser. Subansamblul de recepție cuprinde o

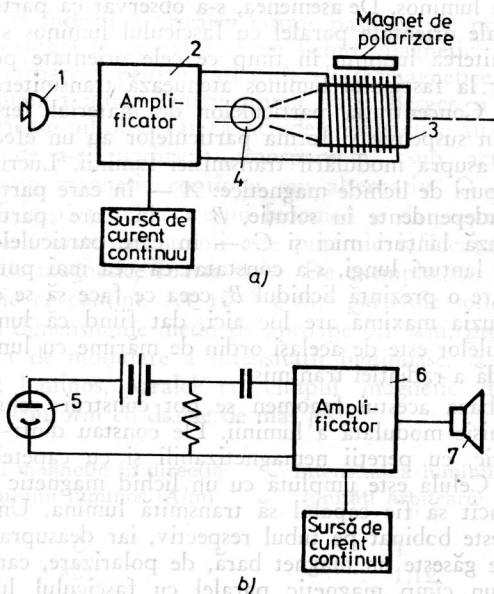


Fig. 21. Principiul de emisie-recepție a semnalelor audio utilizând lichide magnetice.

celulă fotoelectrică, 5, circuite electronice care conectează celula 5 la amplificatorul 6, care, la rîndul său, este conectat la difuzorul 7. Este de preferat ca celula fotoelectrică să fie plasată în focarul unei oglinzi parabolice concave. Un avantaj deosebit al folosirii lichidelor magnetice în modularea transmisiei luminii este necesitatea unui curent de comandă mic. Astfel, solenoizii de comandă ai celulelor de transmisie, descrise mai sus, trebuie să creeze cîmpuri magnetice de ordinul a 800—1 600 A/m și aparatul poate fi astfel tranzistorizat. Procedul este optim în cazul comunicațiilor în care este necesar să fie evitat bruiatul și asigurat secretul comunicațiilor; comunicațiile pot fi făcute numai cînd emisia și recepția se fac la punct fix.

Dar fenomenele și aplicațiile specifice lichidelor magnetice nu se opresc aici.

12. LICHIDELE MAGNETICE ȘI ȘTIINȚELE APLICATE

Drumurile bătătorite în știință duc adeseori la impasuri, dar cunoașterea fenomenelor noi, ce apar în diverse ramuri ale științelor, fac posibilă depășirea acestora.

Astfel, această nouă clasă de materiale magnetice sub formă lichidă, datorită fenomenelor și caracteristicilor proprii, nemaîntâlnite pentru orice alt material, pot oferi rezolvarea unor probleme fără soluții clasice. O deosebită însușire a acestora este conferită de posibilitatea de poziționare în anumite configurații spațiale sub acțiunea unui câmp magnetic. Chiar dacă tehnologia de obținere și utilizare a lichidelor magnetice se găsește la început de drum, se întrevește de pe acum un larg domeniu de utilizare a acestora. De la tehnica spațială la medicină, de la oceanologie la tehnica industrială, lichidele magnetice își reclamă utilitatea la rezolvarea eficientă a celor mai diverse probleme.

De fapt, chiar scopul întocmirii acestei cărți a fost de a da posibilitatea celor mai diverse categorii de cititori de a se familiariza cu cele mai neobișnuite fenomene proprii acestor materiale, pe baza cărora pot fi rezolvate cele mai neașteptate probleme care solicită mintea omenească în viața de fiecare zi.

Dacă încercăm să prezentăm câteva din cele mai deosebite utilizări ale lichidelor magnetice, nu putem să nu amintim de problemele din tehnica spațială ce și-au găsit rezolvarea prin utilizarea acestor lichide.

De fapt, în ce constau aceste rezolvări?

De când a luat amploare activitatea spațială a omului, o importanță crescândă au căpătat-o problemele legate de comportarea lichidelor de propulsie a motoarelor rachetă, depozitate în rezervoarele vehiculelor spațiale și supuse condițiilor de imponderabilitate. Pe măsură ce gravitația descrește, odată cu pătrunderea rachetei în spațiu cosmic, fazele lichide și de vapori din combustibilul rachetei sînt libere să se împrăștie prin rezervor, creînd condiții neprevăzute. Lichidul de propulsie al rachetei, precum și vaporii, pot, desigur, să fie separați și poziționați prin diferite cîmpuri de accelerare, cum ar fi rotirea rezervorului în jurul unei axe proprii sau prin accelerarea rachetei; dar aceste metode necesită energii relativ mari și mecanisme complexe de control, care sînt inacceptabile în special pentru vehiculele mari. O soluție mult mai acceptabilă pentru rezolvarea acestei probleme ar fi folosirea unui propulsant magnetic, supus unei forțe magnetice, orientată în direcția dorită, creîndu-se o gravitație artificială.

Acest propulsant magnetizabil a fost preparat, pentru prima dată, de Papell, în 1963, prin măcinarea pulberii de magnetită într-o moară cu bile, în prezența lichidului propulsant (heptan) și a unui stabilizant (acid oleic). În figura 22 este reprezentat rezervorul motorului rachetă, care poate utiliza în mod avantajos carburantul magnetic. Carburantul este înmagazinat în rezervorul 1, prevăzut cu o conductă de evacuare 2, învecinată cu un magnet permanent 3 și o pompă 4. În condițiile de imponderabilitate, magnetul atrage combustibilul magnetic către conducta de evacuare, datorită faptului că moleculele de combustibil (heptan), care

sînt reținute de către particulele magnetice prin tensiuni superficiale și prin adsorbție, se mișcă odată cu particulele magnetice în zona conductei de evacuare. Prin funcționarea pompei 4, carburantul magnetic se mișcă prin conducta de evacuare și este aprins în ajutorul 5.

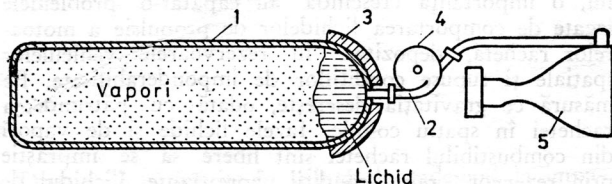


Fig. 22. Rezervorul motorului rachetă cu combustibil magnetic.

În domeniul medicinei, O. H. Schmitt și grupul său de cercetători au studiat și studiază modul de comportare a omului în câmpuri electromagnetice, câmpuri magnetice sau câmpuri electrice de intensități relativ mici. În special, ei caută să lămurească dacă omul este afectat, chiar într-o măsură destul de mică, de câmpurile la care este supus în mediile industriale obișnuite sau în mediul extern. Ei au făcut experiențe complete în care au supus corpurile unor voluntari la un câmp magnetic uniform sau la un gradient de câmp magnetic generat de un sistem de bobine Helmholtz și au controlat dacă corpul poate detecta diferite câmpuri. Ei au găsit câteva persoane ce păreau uimitor de perceptive. Aceste rezultate i-au condus la ipoteza „urechii murdare”: posibilitatea ca indivizii expuși la atmosferă plină de fum să poată avea pe timpanul urechii lor reziduuri feromagnetice, care pot face din ureche un transductor magnetic sensibil în sistemul auditiv. Schmitt și

grupul său folosesc lichide magnetice preparate special pentru a testa această ipoteză.

Mult mai spectaculoasă pare a fi propunerea de utilizare a lichidelor magnetice la tratamentul anevrismelor craniene. Această metodă de tratare a anevrismelor craniene, fără operație chirurgicală, folosind lichide magnetice, a fost elaborată de David Roth de la Harvard Medical School. Un anevrism intracranian este o boală congenitală, care se prezintă ca o umflătură sub forma unui săculeț pe peretele arterei, în mod obișnuit la baza creierului. Ruptura anevrismelor intracraniene este cauzată în majoritatea cazurilor de lovituri, dar, în prezent, operațiile anevrismelor sînt riscante din cauză că acestea sînt localizate lîngă creier. Metoda propusă de David Roth pentru tratarea anevrismelor intracraniene, fără operație chirurgicală, presupune injectarea directă în anevrism a unui lichid magnetic compatibil cu organismul, cu ajutorul unui ac magnetic găurit. Cîmpul magnetic al unor mici magneți, plasați în jurul anevrismului, mențin lichidul magnetic în loc, pentru a nu fi deplasat de forța generată de circulația sîngelui, pînă la vindecarea naturală a organismului care constă în cicatrizarea țesutului (fig. 23), moment în care se pot îndepărta magnetii. Într-o altă variantă,

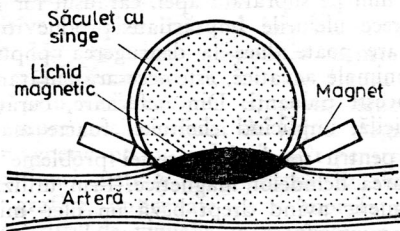


Fig. 23. Folosirea lichidelor magnetice la tratarea anevrismelor.

un lichid magnetic, care se topește la o temperatură puțin deasupra temperaturii corpului omenesc, poate fi injectat, deasupra punctului lui de topire, în anevrism, unde el se solidifică, permițând îndepărtarea imediată a magnetilor.

O altă propunere de utilizare a lichidelor magnetice în domeniul medical este folosirea lor în tratamentul cancerului. Un lichid magnetic este injectat în jetul de sânge și un câmp magnetic este folosit pentru a-l transporta în zona tumorii. Aria tumorii este iradiată cu un fascicul laser, iar lichidul magnetic, care absoarbe lumina laser, va absorbi destulă radiație pentru a distruge celulele canceroase.

În ceea ce privește protecția mediului ambiant, datorită creșterii numărului de produse petroliere pe piața mondială, lucru care a atras după sine și creșterea proporțională a cazurilor în care acestea sînt deversate în apa oceanelor, mărilor, râurilor sau lacurilor, este necesar a se lua unele măsuri de protecție, întrucît majoritatea produselor petroliere împrăștiate duc la accidente marine, avînd și consecințe catastrofale în viața marină sau pe plajă. Frațiunile ușoare din produsele petroliere se evaporă, dar fracțiunile grele reacționează cu aerul dînd multe gudroane, care plutesc într-un strat de 1—1,5 mm pe suprafața apei, căraușul lor fiind vîntul. Deoarece uleiurile împrăștiate produc o serioasă poluare, care poate duce la distrugerea populației de plante și animale acvatice, este necesară curățarea suprafeței de acești poluanți. Din nefericire, curățarea este foarte dificilă, implicînd cheltuieli foarte mari.

O cale pentru rezolvarea acestei probleme o constituie utilizarea lichidelor magnetice. Prin utilizarea unui lichid magnetic avînd drept bază un ulei miscibil cu uleiul de pe suprafața apei, care este dispersat în acesta și apoi sub acțiunea unui câmp magnetic este colectat, oferă o cale pentru rezolvarea acestei probleme. Este de

dorit ca acest lichid magnetic să fie mai puțin dens decât apa de mare sau apa râurilor. De asemenea trebuie să aibă caracteristici de împrăștiere scăzute, o mare susceptibilitate magnetică și să fie netoxice. O problemă importantă este ca stabilizantul din lichidul magnetic să fie solubil în uleiurile gudronate de pe apă, dar insolubil în apă.

Un exemplu tipic de colectare a uleiurilor de pe apă este următorul: se pulverizează lichid magnetic deasupra petei de ulei, iar după o oră, timp în care are loc amestecarea lichidului magnetic cu uleiul deversat, se strânge cu un dispozitiv magnetic. Dispozitivul magnetic constă din unul sau mai mulți magneți rotativi (electromagneți sau magneți permanenți), care ridică uleiul magnetizat de pe suprafața apei. O perie metalică sau un alt mecanism rade uleiul de pe suprafața magnetului rotitor și trece uleiul într-o cameră colectoare. În acest fel, suprafața magnetului rămîne curată pentru a relua contactul cu pelicula de ulei magnetizată de la suprafața apei. Încercările experimentale au arătat că la cinci părți de ulei este necesară numai o parte de lichid magnetic. Un sistem imaginat de firma Avco Ferrofluidics Corporation este reprezentat în figura 24.

Dar să vedem și alte propuneri de utilizare a lichidelor magnetice în alte domenii.

Dispozitive de vizualizare și imprimare cu lichide magnetice. Un asemenea dispozitiv constă dintr-un sistem de vizualizare optică, în care figura poate fi controlată prin varierea unui câmp magnetic, care acționează asupra unei cantități de lichid magnetic opac. Lichidul magnetic poate fi folosit atît pentru formarea de diverse figuri spațiale cît și pentru vizualizarea unor simboluri grafice, imprimate pe o suprafață. Un asemenea dispozitiv de vizualizare se poate imagina prin combinarea unui lichid magnetic opac cu un lichid nemagnetic transparent și nemiscibil cu primul. Cele două

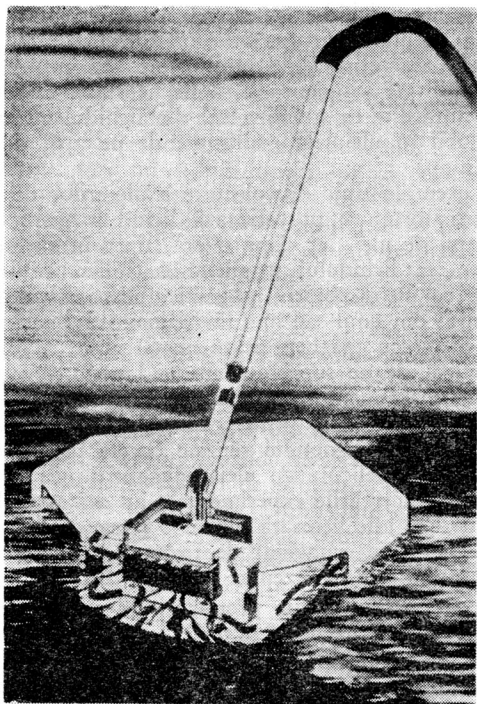


Fig. 24. Aspiratorul magnetic de colectare a produselor petroliere de pe suprafața oceanelor.

lichide sînt conținute în interiorul unui volum finit de o anumită formă, cum ar fi în interiorul unei construcții de tip „sand-wich”. Una dintre fețele acestui dispozitiv este transparentă, astfel încît diferite figuri formate de lichidul magnetic în interiorul construcției sau

figuri desenate pe suprafața interioară, descoperite de lichidul magnetic, să fie ușor vizibile. În una dintre variante, lichidul magnetic opac poate forma figura dorită în situația în care câmpul magnetic are configurația dorită. Câmpul magnetic se creează cu ajutorul unui sistem de bare magnetice alăturate, cu polii de sens contrar alăturați, ceea ce creează un gradient mare de câmp, la distanță mică, în spațiul înconjurător figurii magnetice rămânând lichidul transparent.

Într-o altă variantă, lichidul magnetic, datorită câmpului magnetic creat de sistemul de magneți, poate acoperi un simbol grafic imprimat pe suprafața interioară a sistemului. Prin deplasarea sistemului de magneți exteriori în diferite zone ale suprafeței, lichidul magnetic descoperă simbolul respectiv, acoperind restul. Figura este acum acoperită de lichidul transparent, ceea ce o face vizibilă.

În ceea ce privește cernelurile feromagnetice, acestea se pot folosi în două tipuri de aplicații de imprimare. Într-unul, cerneala este magnetizată, astfel încât un dispozitiv automat poate citi caracterele imprimate. Într-o altă aplicație, cerneala este magnetizată astfel încât depunerea ei poate fi controlată magnetic...

Cernelurile magnetice convenționale conțin particule magnetice mari și au o viscozitate mare. Particulele magnetice mari din aceste cerneluri se separă din lichidul de bază când ele stau în repaus și, în special, când cilindrul imprimator lucrează la viteze mari. Costul mare al imprimatoarelor rotative care lucrează la viteze mici și necesitatea de a agita continuu cerneala au limitat aplicațiile potențiale ale imprimatoarelor de acest tip și implicit ale imprimărilor magnetografice.

Neajunsurile cernelurilor magnetice convenționale se înlătură folosind lichide magnetice. O etapă în procesul de preparare a lichidelor magnetice este îndepărtarea particulelor mari din lichid prin ultracentrifugare, obți-

nîndu-se un coloid stabil. Lichidele magnetice ultrastabile folosite ca cerneluri magnetice fiind centrifugate la o accelerație de peste 17 000 de ori accelerația gravitațională, pot ușor rezista forțelor centrifuge ale cilindrului imprimator. Posibilitatea imprimatoarelor de a lucra cu viteze mai mari, de circa 36 000 rotații pe

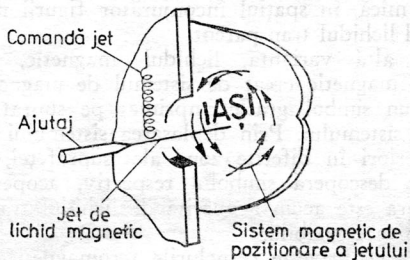


Fig. 25. Principiul imprimatorului cu lichid magnetic.

minut, și comportarea ultrastabilă a lichidelor magnetice reduc costul imprimărilor magnetografice și crește aplicabilitatea cernelurilor magnetice. Acum, aceste cerneluri pot să fie imprimate cu caractere „micro”, cu sensibilitate mai mult decît suficientă pentru a putea fi citite de instalațiile existente.

Multe imprimatoare fără contact folosesc lichide dielectrice sau lichide încărcate electric care sînt trimise ca un jet prin mici orificii de curgere controlate electrostatic. Din cauză că ele sînt magnetice, lichidele magnetice pot fi pulsate și dirijate cu o simplă bobină magnetică, care generează forțe mai puternice și mult mai precis controlabile (fig. 25). Imprimatoarele cu jet de lichid magnetic (fără contact) pot lucra la viteze mai mari decît cele cu contact și cu o putere de intrare mai mică decît imprimatoarele electrostatice.

Lagăre hidrodinamice. Unul din neajunsurile lagărelor hidrodinamice simple este posibilitatea de pierdere a lichidelor lubrifiante folosite. Efectele gravitației, forțele centrifuge mari, temperaturile mari, care micșorează viscozitatea lichidului sub o anumită limită, și alte influențe ridică limite în folosirea unor astfel de lagăre. Prin folosirea unui lubrifiant magnetic adecvat, care poate fi reținut oriunde este necesar de un câmp magnetic, aceste neajunsuri sînt eliminate. Mai mult, un lagăr hidrodinamic corespunzător proiectat, lubrifiat cu un lichid magnetic, nu numai că reduce la minimum neajunsurile citate mai sus, dar poate permite funcționarea lui sub vid, face ca efectele de degazare să fie cele mai mici și reduce frecarea asociată de pornirea și oprirea lagărului. Cea mai simplă metodă de a reține un lichid magnetic între un ax și un lagăr constă în instalarea unui magnet în ax, în lagăr sau în amîndouă părțile. Figura 8 ilustrează un ax nemagnetic cu un magnet permanent introdus în interior, care reține lichidul magnetic în spațiul dintre ax și lagăr. Lagărul este făcut dintr-un material nemagnetic. Acest sistem de lagăr hidrodinamic poate lucra la sarcini mici și viteze mari. Îmbunătățiri substanțiale pot fi aduse prin realizarea unui câmp magnetic de o distribuție adecvată, prin realizarea unor șanțuri în lagăr sau ax pentru o distribuție corespunzătoare a lichidului magnetic, prin localizarea judicioasă a rezervorului cu lichid magnetic și folosind magneți cu energii foarte mari — magneți cu pămînturi rare.

Etanșare cu lichide magnetice. În practică sînt frecvente cazurile cînd trebuie realizată etanșarea trecerii unui ax în mișcare de rotație, de translație sau de roto-translație prin peretele unei incinte. Unele dispozitive de etanșare utilizează drept garnitură de etanșare un inel de lichid, care aderă perfect atît la suprafețele în mișcare cît și la cele staționare. Această idee a stat la

baza concepției etanșoarelor centrifugale în care un lichid este poziționat și lipit de suprafețele în mișcare și cele staționare datorită forțelor centrifuge ce acționează asupra lui. Aceste etanșoare sînt utilizabile numai peste un anumit prag al vitezei de rotație, sub care apar curgerile lichidului și scăpări în zona de etanșare. Lichidele

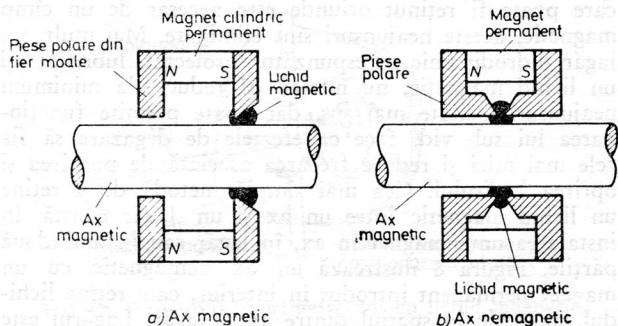


Fig. 26. Folosirea lichidelor magnetice la dispozitive de etanșare.

magnetice oferă posibilitatea înlăturării acestor neajunsuri, prin aceea că forța centrifugă este înlocuită cu forța magnetică. Deoarece forța magnetică este independentă de viteză, acest nou etanșor funcționează cu scăpări zero de la viteza zero la viteze foarte mari. Un câmp magnetic poziționează lichidul magnetic în golul dintre suprafețele elementelor mobile și ale elementelor fixe, formînd un inel sau mai multe inele etanșoare lichide ce reprezintă o barieră ermetică în sistemele sub presiuni diferențiale înalte sau sub vid. Două configurații de bază ale etanșoarelor cu lichid magnetic sînt prezentate în figura 26. Într-un caz axul face parte din circuitul magnetic, iar în celălalt caz, circuitul magne-

tic nu include axul. Un etanșor mai modernizat cuprinde un număr mai mare de inele de lichid etanșoare.

Într-un etanșor cu lichid magnetic, piesele polare din fier sînt magnetizate la saturație de către magnetul permanent, ceea ce face ca în întrefierul cu lichid magnetic cîmpul magnetic să fie între $12 \cdot 10^5$ A/m și $16 \cdot 10^5$ A/m. Din ecuația lui Bernoulli pentru lichidele magnetice se poate scrie presiunea diferențială pe care o suportă un inel de etanșare:

$$\Delta p = \mu_0 M_s H,$$

unde M_s este magnetizația de saturație a lichidului magnetic, exprimată în A/m; H este intensitatea cîmpului magnetic în întrefier, exprimată în A/m, iar Δp este presiunea diferențială în N/m². Un calcul al presiunii diferențiale suportată de un inel de etanșare arată că un lichid magnetic cu $M = 4 \cdot 10^4$ A/m poate suporta o presiune de 59 200 N/m², cînd cîmpul magnetic în întrefier este de $12 \cdot 10^5$ A/m.

În practică, etanșoarele cu lichide magnetice folosesc lichide cu presiuni de vapori joase, dispuse în inele cu o densitate de aproape zece inele pe centimetru de ax, întrefierul avînd o lățime de 0,05—0,15 mm. Pentru structuri rotitoare cu mari neregularități radiale, au fost proiectate și realizate etanșoare cu întrefierul de 0,25 cm.

Ca orice lichid, cînd este încălzit, un lichid magnetic se poate evapora. Creșterea temperaturii lichidului magnetic depășește 100 °C, este necesară răcirea acestuia cu un sistem de răcire. Cea mai înaltă viteză atinsă în acest fel a fost de 120 000 rotații/minut pentru un ax cu diametrul de 4,8 mm, printr-o trecere cu diametrul de 5 mm.

Cu un lichid magnetic cu presiune de vapori foarte mică, cum ar fi polifenil eter, care are presiunea de va-

pori 10^{-10} torri, sau diester, viața unui etanșor poate fi prelungită indefinit de mult, atîta timp cît numărul inelurilor de etanșare este destul de mare.

Nu putem încheia prezentarea acestui mic număr din multitudinea de destinații ce se întrevăd lichidelor magnetice, fără a arăta că acestea sînt utilizate și pentru construirea diverselor modele didactice în școli și să amintim cel puțin de modelul globului pămîntesc. Lichidele magnetice fac posibilă construirea pentru prima dată a unui „adevărat glob pămîntesc“. O sursă centrală de magnetizare (un magnet așezat în centrul globului) va menține un strat de lichid pe glob. Rotind globul, pentru a simula rotația Pămîntului, cu cîmpul magnetic simulînd cîmpul gravitațional, apare un model de laborator a oceanelor de pe globul pămîntesc. Folosind un magnet exterior se poate simula și atracția dintre Pămînt și alte corpuri cerești, putîndu-se evidenția fenomenul mareelor.

* * *

Iată-ne deci la sfîrșitul unei „călătorii“ prin fascinantele aspecte ale acestui nou material magnetic, în care am urmărit un domeniu restrîns din complexitatea fenomenelor și un număr redus de „experiențe de confirmare“ privitoare la acest material magnetic.

Dorința noastră a fost nu de a epuiza subiectul referitor la lichidele magnetice, ci de a oferi cititorilor cîteva aspecte din care să reiasă clar particularitățile nemaiîntîlnite în mod unitar la nici un alt material.

Dacă unora dintre cititori le-am trezit dorința de a citi lucrări mai complete — avînd acest subiect — autorii pot declara că scopul a fost atins.

Oricum, dacă ați reușit să ajungeți cu lectura pînă aici, denotă că nici noi, dar nici dumneavoastră, nu trebuie să renunțăm ușor la continuarea și aprofundarea acestui subiect cu adevărat interesant.

CUPRINS

1. Introducere	5
2. Ce sînt lichidele magnetice?	9
3. O ecuație a lui Bernoulli pentru lichidele magnetice?	24
4. Levitația în lichide magnetice	26
5. Experiențe cu lichide magnetice	39
6. Fenomene care se produc la suprafața lichidelor magnetice	47
7. Lichidele magnetice și conversia de energie	55
8. Rotirea lichidelor magnetice	61
9. Lichidele magnetice — surse acustice	70
10. Lubrifianți magnetici?	73
11. Transparența unui lichid magnetic	76
12. Lichidele magnetice și științele aplicate	80

Coli de tipar: 3. Tirajul: 12 300 ex. Bun
de tipar: 4. VIII. 1978.
Republica Socialistă România
Comanda nr. 142
Tiparul executat la I. P. Sibiu



Încă nu se cunoaște un lichid monofazic cu proprietăți feromagnetice. Dacă însă într-un lichid obișnuit sînt dispersate coloidal particule magnetice solide fine, atunci se obține un lichid cu proprietăți magnetice remarcabile. Autorii prezentei lucrări, înfățișînd proprietățile și aplicațiile lichidelor magnetice, au pornit de la intenția de a trezi dorința ca unii dintre cititori să se intereseze mai îndeaproape de substanțele cu proprietăți neobișnuite.